

Las partículas elementales

El corazón de la materia

Un paseo por el
COSMOS

Las partículas elementales

El corazón de la materia



The Doctor y La Comunidad

Redigiralización: The Doctor

<http://thedoctorwho1967.blogspot.com.ar/>

<http://el1900.blogspot.com.ar/>

<http://librosrevistasinteresesanexo.blogspot.com.ar/>

<https://labibliotecadeldrmoreau.blogspot.com/>

Imagen de cubierta: Visión artística de un campo cuántico, una especie de fluido que ocupa todo el espacio, cuyas vibraciones son lo que conocemos como partículas elementales.

Dirección científica de la colección: Manuel Lozano Leyva

© José Ignacio Illana Calero por el texto

© RBA Contenidos Editoriales y Audiovisuales, S.A.U.

© 2016, RBA Coleccionables, S.A.

Realización: EDITEC

Diseño cubierta: Llorenç Martí

Diseño interior: tactilestudio

Infografías: Joan Pejoan

Fotografías: Archivo RBA: portada; 35d, 115, 151b; Maximilien Brice/CERN: 47, 131; CERN: 79b; Jacques Fichet/CERN: 79a; Matthew Kapust/Centro de Investigación Subterráneo del Laboratorio Sanford: 151ai; NASA/CXC/M. Weiss: 151ad; Science Photo Library/Age Fotostock: 35i; Sarah Szabo: 142, 143.

Reservados todos los derechos. Ninguna parte de esta publicación puede ser reproducida, almacenada o transmitida por ningún medio sin permiso del editor.

ISBN: 978-84-473-8671-0

Depósito legal: B-20372-2016

Impreso y encuadrado en Rodesa, Villatuerta (Navarra)

Impreso en España - *Printed in Spain*

SUMARIO

INTRODUCCIÓN	7	
CAPÍTULO 1	Hacia el paradigma actual	13
CAPÍTULO 2	No son partículas sino campos	37
CAPÍTULO 3	El corazón de la materia	69
CAPÍTULO 4	La simetría dicta las interacciones	109
CAPÍTULO 5	¿Ya lo sabemos todo?	137
LECTURAS RECOMENDADAS	153	
ÍNDICE	155	

La física de partículas trata de encontrar respuestas a algunas de las preguntas fundamentales que han acuciado a la humanidad desde siempre: ¿cuáles son los principios básicos que gobiernan la evolución del universo?, ¿cuáles son los constituyentes de la materia?, ¿cómo interaccionan?

Los físicos no tenemos todas las respuestas, ni las respuestas que vamos descubriendo son definitivas. Nuestro nivel de conocimiento sobre la naturaleza es gradual e inevitablemente imperfecto. Ni siquiera sabemos si el funcionamiento del universo se ajusta a unas reglas, aunque hasta ahora todo parece indicar que así es. Lo que da fuerza a nuestros argumentos, que llamamos *hipótesis*, es que sirven para explicar los fenómenos que observamos. Si estas pasan el escrutinio del experimento se les da categoría de *teorías*. Pero nunca se puede decir que una teoría científica es correcta, solo que es «útil». Eso sí, basta un único fenómeno contrastado que la contradiga para que una teoría necesite ser revisada y sustituida por otra.

Por lo general, una teoría fallida no es totalmente desechada, sino que puede seguir utilizándose en cierto dominio donde esta sea una buena aproximación de la realidad: la nueva teoría es

más general y se reduce en ciertos límites a la teoría anterior, lo que justifica por qué había funcionado antes. En este sentido decimos que las teorías son superadas por otras. Obviamente, no es práctico tener una teoría distinta para cada fenómeno. El objetivo final es conseguir teorías cada vez más simples, basadas en el menor número de principios básicos, que sean capaces de explicar todos los experimentos, incluso los más sofisticados.

Es precisamente la capacidad de contraste lo que distingue a la ciencia de la religión o la filosofía, que también buscan explicaciones a las preguntas fundamentales pero basan sus respuestas en la fe de sus adeptos o en la autoridad de los proponentes. Cuando un conjunto de teorías científicas explica todo lo que hemos experimentado tenemos un *paradigma*, una interpretación completa de la realidad que nos da una visión global de las cosas. Es humano identificar esa visión de la realidad con la realidad misma, o creer que estamos en posesión de la verdad, pero no debemos caer en la trampa. La ciencia no es dogmática, no hay verdades absolutas, y el paradigma actual podría no resistir futuras evidencias experimentales. De hecho, ya ha pasado otras veces que el paradigma ha cambiado. El principal objetivo de este libro es describir la visión actual y también presentar algunas razones por las que pensamos que probablemente no es la definitiva.

A base de aplicar el método científico, nos hemos forjado una idea de la estructura íntima de la materia y de las interacciones fundamentales que difiere mucho de una visión mecanicista basada en diminutos corpúsculos que experimentan fuerzas a distancia. El paradigma actual, sustentado en los dos pilares de la física moderna, la *teoría de la relatividad* y la *teoría cuántica*, describe un mundo subatómico dominado por la deslocalización y la incertidumbre, donde los nuevos «átomos» indivisibles o *elementos* fundamentales no son partículas sino *campos cuánticos* que se extienden por todo el espacio. De esta forma podemos interpretar más adecuadamente ciertos fenómenos como la *difracción de electrones*, que requieren que estos se comporten a la vez como *ondas* y como *partículas*. Los campos son una magnitud que puede variar en cada punto del espacio y en cada instante del tiempo. Al campo se le puede hacer vibrar al comu-

nirle energía, produciéndose entonces unas ondas parecidas a las olas de un estanque. Llamamos «partículas» a esas «ondas», paquetes de energía o *cuantos* del campo. A nivel macroscópico la incertidumbre es tan pequeña que recuperamos la sensación de localización y determinismo a los que estamos acostumbrados en el mundo «clásico». La percepción «corpuscular» de una partícula elemental, que deja una huella localizada en un detector, es consecuencia de que la interacción entre campos se produce en un punto del espacio; no se debe a que la partícula sea un objeto microscópico, no es una bolita de materia.

Gracias a los campos cuánticos, compatibles con la teoría de la relatividad y la teoría cuántica, podremos entender fenómenos que de otra forma resultarían inexplicables. Para ello tendremos que desterrar algunos prejuicios, adquiridos durante siglos de visión clásica de la realidad. Descubriremos y asumiremos que *masa* y *energía* son intercambiables; que no todas las partículas tienen masa y que la masa no es exactamente la cantidad de materia sino más bien una especie de energía cristalizada; que las partículas elementales no ocupan un volumen, tienen tamaño cero; que la mayoría de ellas viven pequeñísimas fracciones de segundo, pero no se desintegran en pedazos sino que más bien se convierten en otras partículas, técnicamente decaen, en un proceso en el que se conserva la energía; que no todas las partículas son constituyentes de la materia, no solo por la corta vida de muchas de ellas, sino porque algunas no tienen que ver con la materia sino con las interacciones; que existe una forma de materia que llamamos *antimateria*; y que todo, materia e interacciones, son campos cuánticos, una unificación conceptual que permite tratarlos en pie de igualdad y deducir su origen a partir de la *simetría*. Parecería que esta última es una apreciación subjetiva de la realidad, pues tras la simetría subyace la idea de belleza de las cosas. Sin embargo, el descubrimiento del papel que desempeñan las simetrías en las ecuaciones que describen el mundo físico ha sido seguramente, junto con la introducción del concepto de campo, el gran motor que ha propiciado el progreso en nuestra comprensión de las leyes fundamentales que rigen el universo. Este es el paradigma actual.

Con esta visión de las cosas, tras décadas de experimentación con rayos cósmicos y cada vez más potentes colisionadores de partículas, hemos elaborado un modelo de la realidad, es decir, una realización concreta de este paradigma aplicada a nuestro universo. El modelo que describe el corazón de la materia y las interacciones entre sus elementos fundamentales es una teoría de campos cuánticos que llamamos *modelo estándar*. No solo clasifica correctamente los distintos tipos de partículas que han revelado nuestros modernos colisionadores, seis *quarks* y seis *leptones*, sino que da cuenta de las interacciones entre ellos para formar estructuras microscópicas: protón, neutrón, núcleos, átomos y moléculas, y cientos de partículas subatómicas compuestas e inestables que se agrupan en *mesones* y *bariones*. Tres interacciones bastan para tal fin: *electromagnética*, *nuclear débil* y *nuclear fuerte*. Además, explica el origen y naturaleza de las radiaciones y sirve para comprender la historia del universo temprano. También explica el origen de la masa mediante un mecanismo, confirmado experimentalmente con el descubrimiento del bosón de Higgs, que se halla inspirado en el mismo principio de simetría que dicta las interacciones.

Pese a su enorme éxito, sabemos que el modelo estándar se queda corto, pues deja lagunas, conceptuales y prácticas. En particular, no incluye la *interacción gravitatoria*, la más familiar pero la más débil de todas las interacciones fundamentales, irrelevante, por suerte, a nivel microscópico a las escalas que hemos logrado explorar en el laboratorio. Esta interacción no forma parte del modelo estándar porque no tenemos una teoría cuántica de la gravedad. La gravedad es también un campo, pero es uno muy especial, lo que dificulta la construcción de su versión cuántica de forma análoga a las demás interacciones: el campo gravitatorio describe la geometría del propio espacio-tiempo, que no es un escenario estático sino que se curva en presencia de una masa, se estira —el universo está en expansión— y hasta se le puede hacer vibrar, produciendo las ondas gravitatorias, detectadas de manera directa recientemente. A nivel macroscópico, la materia tiende a ser eléctricamente neutra, por lo que la otra interacción de largo alcance, el *electromagnetismo*, queda

anulada y el universo a grandes distancias está dominado por la interacción gravitatoria. La teoría que da cuenta de la dinámica y la formación de estructuras a gran escala en el cosmos es la relatividad general de Einstein, una teoría clásica. Sin embargo, cuando el universo era microscópico, en los primeros instantes tras la gran explosión que lo originó, la densidad de materia era tan alta que los efectos de la gravedad no eran despreciables comparados con los de las otras fuerzas. Para explicar la física en este dominio hace falta una teoría cuántica que incluya la gravedad, de la que no disponemos.

Por otro lado, precisamente por sus efectos gravitatorios, se sabe que en el universo hay un tipo de materia que llamamos *materia oscura*. Es unas cinco veces más abundante que la materia ordinaria, no brilla —no emite radiación electromagnética— e interacciona muy débilmente. Habiéndose descartado que corresponda a estrellas enanas, planetas, otros astros, y acumulaciones de gas y polvo no luminosos, así como tampoco a neutrinos, debemos suponer que está compuesta por campos distintos a los del modelo estándar. Los cuantos de esos nuevos campos son nuevas partículas que aún no se han descubierto directamente pero podrían detectarse en alguno de los varios experimentos que las andan buscando, o incluso crearse y, con suerte, detectarse en el LHC, el acelerador de partículas más potente del mundo, si tienen masa e intensidad de interacción en el rango accesible. Para dar cuenta de la composición y propiedades de la materia oscura hay varias opciones: añadir al modelo estándar nuevos campos cuánticos con un esquema de simetrías más general y quizás más bosones de Higgs, o cambiar radicalmente de paradigma, suponiendo que existen otras dimensiones. Probablemente los experimentos en marcha nos mostrarán pronto el camino.

Hacia el paradigma actual

La imagen intuitiva de un universo hecho de piezas diminutas que se combinan para formar el gran edificio de todo lo que conocemos se ha ido diluyendo conforme iban aumentando la precisión y el alcance de nuestros experimentos. Repasemos las claves que han supuesto un profundo cambio en la visión del microcosmos.

Mucho ha cambiado el paradigma desde la época de los antiguos griegos. Los presocráticos entendían los elementos como principio de todas las cosas. Por cierto, la palabra elemento viene del latín *elementum*, que viene a significar componente básico y tiene su origen en una secuencia de letras del abecedario, que se dividía en dos listas, la primera de las cuales empezaba por A, Be, Ce y la segunda por El, Em, En. Los elementos de la Antigüedad eran cuatro: agua, aire, fuego y tierra, a los que Aristóteles añadió más tarde un quinto elemento, la quintaesencia, del que estarían hechos los cuerpos celestes. Demócrito, contemporáneo de Sócrates, fue el primero en introducir la idea de *átomo*, en griego «indivisible», con distintas formas y tamaños, que al combinarse conferían a la materia sus distintas propiedades. Pero, como todas las teorías filosóficas griegas, el atomismo no basaba sus postulados en la experimentación sino en razonamientos lógicos.

La verdadera ciencia nació en el siglo xvii, cuando Galileo Galilei estableció el método científico e Isaac Newton formuló las leyes de la dinámica: las causas de los cambios de movimiento (aceleraciones) son las fuerzas y en ausencia de estas el movi-

miento es rectilíneo y uniforme. El mismo Newton fue quien descubrió la *ley de la gravitación universal* que describe tanto la caída de los cuerpos como la orbitación de los astros mediante la acción de una misma fuerza atractiva, la gravedad, del latín *gravis*, que significa pesado. Así, fue la gravedad la primera de las interacciones fundamentales en ser interpretada científicamente: la intensidad de la fuerza de atracción gravitatoria entre dos cuerpos es proporcional a sus masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre ellos. No se sabía, sin embargo, qué causaba esa acción a distancia entre ambos cuerpos.

Por aquel entonces electricidad y magnetismo, hoy también consideradas interacciones fundamentales, eran todavía meras curiosidades. Los fenómenos eléctricos se conocían desde la antigua Grecia: tras frotar una varilla de ámbar con un trozo de piel se observaba que esta se erizaba y que el ámbar podía atraer pequeños objetos, cabellos por ejemplo. La palabra electricidad deriva del griego *elektrum*, que significa ámbar. Los fenómenos magnéticos se conocían desde mucho antes que los eléctricos: trozos de un mineral llamado magnetita, un imán natural que debe su nombre a la ciudad griega de Magnesia, podían atraerse o repelerse entre sí, dependiendo de su orientación relativa, y además, suspendidos libremente, tenían la propiedad de alinearse en dirección norte-sur, lo que dio origen al invento chino de la brújula.

Con la aplicación del método científico, empezamos a desencontrar estos fenómenos en el siglo XVII. El científico, político e inventor del pararrayos Benjamin Franklin descubrió que hay cargas de dos tipos, positivas y negativas, y que cargas de distinto signo se atraen, mientras que las de igual signo se repelen. Poco después, Charles-Augustin de Coulomb descubrió la ley que describe la intensidad de la fuerza eléctrica. Ya en el siglo XIX, André-Marie Ampère y Hans Christian Oersted mostraron que las cargas en movimiento, es decir, corrientes eléctricas, podían producir efectos magnéticos, el fundamento del electroimán. Y poco después Michael Faraday mostró que los imanes en movimiento podían producir corrientes eléctricas, lo que condujo al invento del motor eléctrico y preparó el camino ha-

cia la tecnología moderna. Así pues, electricidad y magnetismo están interrelacionados.

Fue también a principios del siglo XIX cuando la idea de que la materia estuviera constituida por átomos pudo ser considerada como una teoría científica. En 1805, John Dalton logró medir la masa de reactivos y productos de una reacción química, concluyendo que las sustancias están compuestas de átomos esféricos idénticos para un mismo elemento, pero diferentes de un elemento químico a otro. Así que un elemento químico está formado por átomos de la misma clase, que no se pueden dividir en otros más simples mediante una reacción química.

Pero el gran avance se produjo en 1865, cuando James Clerk Maxwell reunió todos los resultados conocidos sobre electricidad y magnetismo y los formuló en una única teoría basada en cuatro ecuaciones. Las *ecuaciones de Maxwell* no solo sintetizaban las características y relaciones entre electricidad y magnetismo, sino que además predecían la existencia de *ondas electromagnéticas*, así como su velocidad, que viene dada por las propiedades eléctricas y magnéticas del medio por el que se propagaban, incluido el vacío.

Recordemos que una onda es la propagación por el espacio de una perturbación periódica, una vibración o, en general, la oscilación de algo. La dirección de propagación puede ser paralela (onda longitudinal) o perpendicular (onda transversal) a la oscilación causante, como en el caso de las ondas sonoras o el de las olas producidas al golpear la superficie de un estanque, respectivamente. Cuando una onda alcanza un punto en su propagación, este se pone a oscilar. La distancia mínima entre dos puntos en el mismo estado de oscilación es la *longitud de onda*. La *frecuencia* de una onda viene dada por el cociente de la velocidad de propagación de la onda y su longitud de onda.

En el vacío, la velocidad de las ondas electromagnéticas es independiente de la longitud de onda y perfectamente coincidente con la velocidad de la luz, que ya se había medido bastante bien en el siglo XIX. Así que las ecuaciones de Maxwell nos muestran que la luz es una onda electromagnética en el rango de longitudes de onda que corresponde al espectro visible. De la misma

forma que no logramos oír sonidos muy agudos (ultrasonidos) o muy graves (infrasonidos), solo logramos ver un determinado intervalo de longitudes de onda del espectro electromagnético, los distintos colores. Las primeras ondas electromagnéticas fueron producidas y detectadas por Heinrich Rudolf Hertz en 1885. Las ondas hertzianas, sin embargo, tienen longitudes de onda mucho mayores que las del rango visible, en la región que hoy llamamos ondas de radio. Son las que poco después usó Marconi, quien patentó la radio para la telegrafía sin hilos.

ARROJANDO LUZ

Conviene mencionar en este punto que existían dos modelos en liza para explicar la naturaleza de la luz. Newton había afianzado el modelo corpuscular, que ya venía de los antiguos griegos, quienes la consideraban un chorro de partículas. Pero Robert Hooke, enemigo acérrimo de Newton, proponía que la luz era una onda, como el sonido. Aunque fue otro contemporáneo, Christiaan Huygens, quien desarrolló la teoría ondulatoria y mostró cómo podían explicarse con ondas la reflexión y la refracción. La gran autoridad científica de Newton impidió que la teoría ondulatoria progresara y no fue hasta el primer cuarto del siglo XIX cuando, gracias a ella, Thomas Young explicó el fenómeno de las interferencias y Augustin-Jean Fresnel la difracción y la polarización de la luz, fenómenos genuinamente ondulatorios que habían sido descubiertos en el siglo XVII. Por tanto, Maxwell acababa de inclinar la balanza en favor de la teoría ondulatoria. Pero ocurrió mucho más que eso.

Una cuestión sorprendente que traía de cabeza a los físicos de la época era que, si la luz fuese una onda como el sonido, es decir, el resultado de una vibración, ¿cómo podía propagarse por el espacio vacío? Tengamos en cuenta que si quitamos el aire, y en ausencia de cualquier otro medio elástico que lo trasmita, no nos llega el sonido. Había que suponer la existencia de un medio que permeara todos los objetos transparentes, incluido el vacío, al que se llamó éter luminífero. Debía ser muy extraño. Tendría que

ser muy difícil de comprimir, pues la velocidad de la luz es altísima y es conocido que un sonido se transmite a mayor velocidad por los rafles del tren que por el aire. Y debía ser muy tenue a la vez, porque obviamente no ofrece ninguna resistencia al paso de los objetos que se mueven por él, como por ejemplo los planetas por el espacio.

Además, la velocidad de la luz debía ser independiente del movimiento de la fuente, lo que no ocurriría si la luz consistiera solo en corpúsculos, aunque debía depender de la velocidad del receptor respecto al medio, como ocurre con el sonido. Piénsese en el sonido como golpecitos que se dan periódicamente a un medio elástico mediante una vibración. El sonido del motor de un avión a reacción en vuelo no se propaga por el aire más rápido que cuando está parado en la pista de despegue, pero para el piloto las ondas sonoras emitidas frontalmente se alejan de él más lentamente que en reposo, pudiendo incluso llegar a adelantártelas si el avión es supersónico. Sin embargo, el famoso experimento de Albert Abraham Michelson y Edward Williams Morley y sus posteriores refinamientos entre 1881 y hasta bien entrado el siglo XX mostraron que sorprendentemente la luz viaja siempre a la misma velocidad, aunque fuente y receptor se muevan. Si perseguimos un rayo de luz no solo nunca lo adelantaremos sino que siempre lo veremos alejarse de nosotros a la misma velocidad.

La explicación a ambas cuestiones está escondida en las ecuaciones de Maxwell y fue reconocida por Albert Einstein, quien, inspirado en ellas, formuló en 1905 su *teoría de la relatividad especial*, que cambió profundamente nuestra visión del mundo.

La primera clave está en que las ecuaciones de Maxwell no expresan directamente la relación entre cargas y fuerzas sino que están formuladas en términos del campo eléctrico y el campo magnético. La idea de campo, introducida por Faraday, viene a sustituir al concepto casi mágico de acción a distancia, según el cual una carga ejerce instantáneamente una fuerza sobre otra a través del espacio. En la nueva visión, una carga modifica las propiedades de la región del espacio que la rodea, de tal modo que

Se debe hacer todo tan sencillo como sea posible, pero no más sencillo.

ALBERT EINSTEIN

otra carga experimentará una fuerza mientras esté en esa región, donde se dice que «existe» un campo. Parece una complicación innecesaria pero gracias al concepto de campo el tratamiento matemático de todos los fenómenos eléctricos y magnéticos, y también los gravitatorios y los debidos a todas las demás interacciones, no solo es posible sino que se simplifica enormemente. Así, por ejemplo, la existencia de las ondas electromagnéticas no se había concebido antes porque estas no son otra cosa que un campo eléctrico variable, que produce un campo magnético variable, que produce un campo eléctrico variable, y así sucesivamente. Una vez producidas, estas ondas pueden por tanto automantenerse en ausencia de cargas. El campo es entonces una entidad real que transmite las fuerzas, comunicando energía de un punto del espacio a otro en un tiempo finito. Y la luz es la propagación de oscilaciones de campos eléctricos y magnéticos. La introducción del concepto de campo fue descrita por el mismo Einstein como el cambio en la concepción de la realidad más profundo y fructífero que ha acontecido desde los tiempos de Newton.

La segunda clave es que las ecuaciones de Maxwell no están referidas a un marco de referencia concreto, de modo que la velocidad de las ondas electromagnéticas en el vacío que se deriva de dichas ecuaciones es independiente de respecto a qué se muevan fuente u observador. Esto va en contra de nuestra experiencia cotidiana, pues si uno persigue o huye de algo en movimiento, ya sea una partícula o una onda sonora, lo observará a una velocidad distinta.

Einstein desterró la idea del éter luminífero, que ya no se necesita, porque no es un medio el que vibra sino que es el campo electromagnético el que oscila, y construyó la teoría de la relatividad especial a partir de dos postulados o principios básicos: un observador no acelerado no puede distinguir el reposo del movimiento, solo existe el movimiento *relativo* (principio de relatividad) y la velocidad de la luz en el vacío es la misma para todos los observadores. La consecuencia inmediata y contraria a la intuición es que el tiempo pasa a distinto ritmo para dos observadores en movimiento relativo, con lo que también obten-

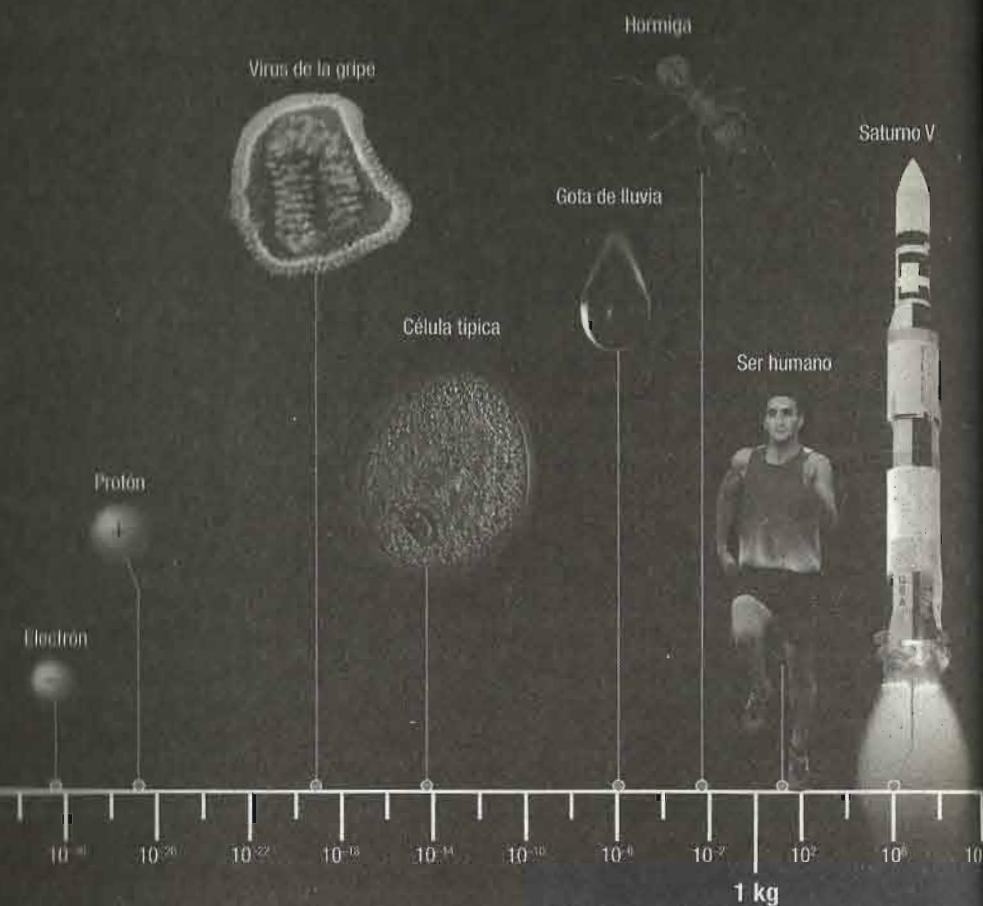
drán distintos valores de la distancia entre dos puntos cualesquiera. Estas conclusiones son verdaderamente revolucionarias y han sido comprobadas hoy en día con mucha precisión. Estos efectos relativistas solamente son apreciables cuando las velocidades relativas son comparables a la velocidad de la luz, que es enorme. Por eso nuestra intuición no está desarrollada para asumirlos.

Ambos postulados de la relatividad se recogen en una propiedad llamada *covariancia*, que deben cumplir todas las leyes de la física y que ya poseían las ecuaciones de Maxwell, de ahí su éxito: aunque cada observador obtenga distintos valores de algunas magnitudes físicas, las leyes, que expresan ciertas relaciones entre ellas, han de ser las mismas, independientes del observador. Así, los valores del campo eléctrico y el campo magnético que midan dos observadores en movimiento relativo serán distintos, pero la velocidad de las ondas electromagnéticas que se deduce de las ecuaciones de Maxwell no está referida a ningún sistema de referencia concreto, pues es la misma para todos. Por otro lado, la percepción de si un fenómeno es eléctrico o magnético es relativa: un observador en reposo respecto a una carga dirá que esta crea solamente un campo eléctrico, no aprecia un campo magnético, pero uno que la vea en movimiento dirá que crea un campo eléctrico y otro magnético. Esto supone la unificación de la electricidad y el magnetismo, que son dos manifestaciones del mismo fenómeno, el *electromagnetismo*.

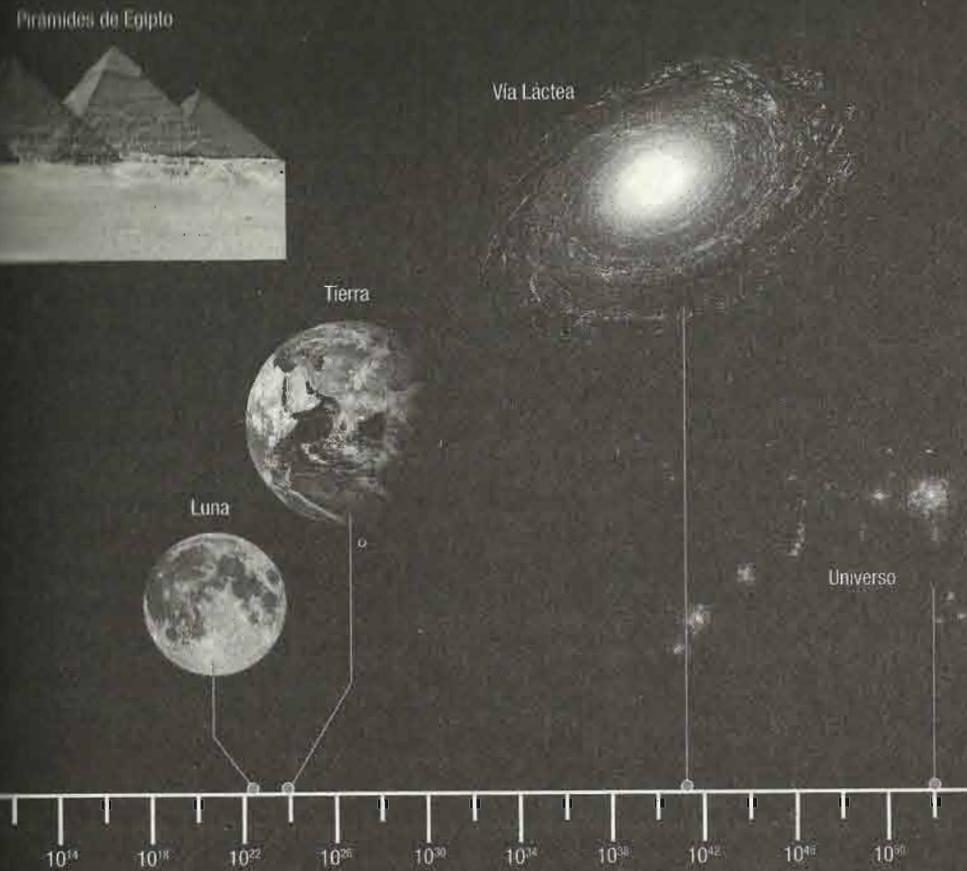
EL ÁTOMO SE DESMORONA

Mientras tanto, poco antes de la publicación de la teoría de la relatividad especial, el modelo atómico de Dalton se había venido abajo. En 1896, Joseph John Thomson descubrió el electrón, una partícula con una masa (véase la imagen de las páginas siguientes) de aproximadamente media milésima de la de un átomo de hidrógeno, que es el átomo más ligero, y carga eléctrica negativa, de la que están hechos los rayos catódicos. Estos rayos eran emitidos al calentar el cátodo (electrodo negativo) situado en

LA MASA DEL ELECTRÓN COMPARADA CON OTRAS



El electrón es quizás la partícula elemental que mejor conocemos en nuestro ámbito doméstico, puesto que la electricidad que usamos en viviendas, locales e infinidad de infraestructuras, es en esencia el flujo de estas partículas a través de los materiales conductores. Pese a estar familiarizados con el electrón en ese aspecto, resulta difícil hacerse una idea de cuán minúscula



es su masa si no tenemos más referencia que los números. Pero si la comparamos con las de otras cosas de nuestro entorno cotidiano, así como con las masas de otros cuerpos microscópicos y también con las de estructuras gigantescas, incluyendo al propio universo conocido enteramente, tendremos una idea más clara de lo infinitamente pequeña que es la masa de esta partícula elemental.

un extremo de un tubo de vacío y se detectaban detrás del electrodo positivo al otro extremo, donde se colocaba una pantalla fluorescente. Los rayos catódicos pueden desviarse mediante campos electromagnéticos, lo que constituye el fundamento de los antiguos televisores.

Así que el átomo de la química no es indivisible. Thomson supuso que, como la materia es eléctricamente neutra, los electrones debían distribuirse en el átomo como si fueran pasas en un bizcocho. Este tendría igual carga que la suma de todos los electrones pero signo positivo. Así las cargas se compensarían. Pero si se logra arrancar las pasas, es decir, los electrones, se forman iones cargados positivamente.

También en 1896, Henri Becquerel descubrió en las sales de uranio la *radiactividad* natural, un fenómeno por el cual ciertas sustancias emiten «radiaciones» capaces de velar placas fotográficas. Pronto, Marie y Pierre Curie, estudiando más a fondo el fenómeno, descubrieron otras sustancias con las mismas propiedades: torio, radio, polonio, etc. En torno a 1900, Ernest Rutherford clasificó la radiación en tres tipos según su grado de penetración en los objetos y de deflexión por un campo magnético: radiación alfa, beta y gamma. En el mismo año, Becquerel descubrió que la radiación beta se correspondía con los electrones de Thomson y en 1908 Rutherford demostró que los rayos alfa son núcleos de helio (el segundo átomo más ligero) que han perdido sus dos electrones. La radiación gamma no era de naturaleza corpuscular sino electromagnética, de energía aun mayor que la de los rayos X descubiertos por Wilhelm Röntgen en 1895, y que tienen longitudes de onda muy inferiores a las de la luz visible.

Los rayos alfa eran los menos penetrantes y fueron usados por Rutherford en su famoso experimento en el que los hacía incidir sobre una finísima lámina de oro. En realidad fue una serie de experimentos llevados a cabo entre 1908 y 1913 por Hans Geiger y Ernest Marsden, bajo la dirección de Rutherford, quien, observando cómo se desviaban las partículas alfa, dedujo un nuevo modelo atómico. El átomo debía estar formado por un núcleo cargado positivamente de radio muy pequeño donde se concentraba casi toda la masa y una corteza formada por electrones

girando en torno al núcleo en una órbita relativamente alejada de este, como si de un sistema planetario se tratara.

El mismo Rutherford descubrió el protón en 1919, como constituyente del núcleo del átomo de hidrógeno, con igual carga que el electrón aunque de signo contrario, pero de masa unas dos mil veces mayor, y propuso la existencia del neutrón, que fue descubierto por James Chadwick en 1932. El neutrón se encuentra también en el núcleo atómico y tiene una masa muy parecida a la del protón, aunque es eléctricamente neutro. El número de protones del núcleo es igual al número de electrones de la corteza cuando el átomo es neutro. La palabra protón viene del griego y significa «el primero». La palabra neutrón viene del latín, de la negación de *uter* (uno u otro de dos), es decir, ni uno ni otro.

Si alguien no queda confundido por la física cuántica, es que no la ha entendido.

NIELS BOHR

ONDAS Y CORPÚSCULOS

El modelo atómico de Rutherford tenía, sin embargo, un grave problema: aplicando la teoría clásica del electromagnetismo, los átomos no podían ser estables: un electrón orbitando alrededor del núcleo debe perder energía en forma de ondas electromagnéticas y por tanto acabaría cayendo a este. Además, no había explicación para el hecho de que los átomos pueden absorber y emitir radiación electromagnética, pero solamente en longitudes de onda muy concretas. De hecho, las lámparas de vapor de sodio o de mercurio usadas para iluminar las calles se basan en eso: un tubo de descarga que mediante una diferencia de potencial adecuada comunica energía a los átomos, excitándolos. Inmediatamente estos se desexcitan devolviendo esa energía en forma de luz de longitudes de onda determinadas, llamadas *líneas de emisión*: amarilla en el caso del sodio o azul y verde en el del mercurio.

Ambas cuestiones fueron resueltas gracias a la incipiente *teoría cuántica*, el otro gran pilar de la física actual, junto con la

relatividad, que nació en 1900 casi a la vez que ésta, para solucionar precisamente un problema relacionado con la radiación: el problema del *cuerpo negro*. Cuando un objeto está caliente emite radiación térmica, debido a las vibraciones microscópicas de sus componentes, con un rango de longitudes de onda característico que depende de la temperatura: cuanto más caliente, mayor es la energía total emitida, y también menores son las longitudes de onda a las que se emite más energía, lo que se traduce en un cambio de color (el material se puede poner al rojo vivo). Un cuerpo negro es un caso ideal en el que ninguna radiación incidente es reflejada y tampoco se deja escapar ninguna radiación al exterior.

Aunque resulte paradójico, las estrellas (emisión estelar) y el propio universo (radiación de fondo) se comportan en muy buena aproximación como cuerpos negros. El Sol tiene una temperatura superficial de unos 6 000 grados. Un cuerpo negro de esa temperatura emite el 99% de su energía en el rango de longitudes de onda entre 150 nm y 4 000 nm. Un nanómetro (nm) es la milésima parte de una micra o micrómetro (μm), que es la milésima parte de un milímetro (mm). No es por tanto de extrañar que nuestros ojos se hayan adaptado al intervalo que llamamos luz visible, entre aproximadamente 380 nm (violeta) y 800 nm (rojo). La atmósfera filtra longitudes de onda inferiores a unos 300 nm (ultravioleta), que son dañinas, y por encima de unos 2 500 nm (infrarrojo). Recordemos que la frecuencia es inversamente proporcional a la longitud de onda, así que ultravioleta e infrarrojo corresponden a frecuencias mayores y menores, respectivamente, que las de la luz visible.

Pues bien, si uno calcula con la teoría clásica la energía total de un cuerpo negro de una temperatura dada obtiene un valor infinito, porque resulta que cuanto más cortas son las longitudes de onda, más contribuyen a la energía, infinitamente si estas son cero. Es lo que se denominaba la *catástrofe ultravioleta*. A Max Planck (1858-1947) se le ocurrió modificar el cálculo, de modo que para cada longitud de onda no todas las energías fueran posibles sino solamente los múltiplos enteros de una cantidad mínima, *quantum* o *cuanto*, de valor $E_{\min} = h\nu$. Esto es, el producto de la constante de Planck h , cuyo valor universal se mide

comparando con los resultados experimentales, y la frecuencia $\nu = c/\lambda$, donde c es la velocidad de la luz y λ la longitud de onda. De esta forma, al repartirse la energía, las longitudes de onda más cortas, o sea, frecuencias mayores, tocan a pocos cuantos, o ninguno, evitándose la catástrofe ultravioleta. En adelante, diremos que una magnitud física está *cuantizada* cuando solamente puede tomar ciertos valores discretos, es decir, discontinuos, una suma de cantidades que pueden contarse: uno, dos, tres...

En un principio, no se creía que los cuantos de Planck, paquetes mínimos de energía de una onda electromagnética, fuesen algo con existencia real. El mismo Planck consideraba su hallazgo una «fórmula de interpolación adivinada de forma afortunada». Sin embargo, en 1905 Einstein explicó el *efecto fotoeléctrico*, que había sido descubierto por Hertz dieciocho años antes, usando la hipótesis de los cuantos: al iluminar una placa metálica, o fotocélula, se pueden arrancar electrones produciéndose una corriente, pero el umbral del proceso y la energía de los electrones no depende de la intensidad de la luz sino de su frecuencia. Einstein indicó que los cuantos de luz transfieren energía a los electrones expulsándolos de los átomos si su frecuencia, o sea, su energía, es suficientemente alta. Fue esta explicación, no su teoría de la relatividad, lo que le hizo merecedor del premio Nobel de Física en 1921. Planck lo había recibido tres años antes por introducir la idea de los cuantos. Se debe más bien a Einstein su «descubrimiento».

En 1913, Niels Bohr, inspirado por el efecto fotoeléctrico, amplió las condiciones de cuantización de Planck para explicar la estabilidad de los átomos y el carácter discontinuo de la radiación atómica. El átomo de Bohr sí es estable porque se impone «a mano» que no todas las órbitas de los electrones sean posibles sino solamente aquellas en las que su *momento angular* orbital, una magnitud física asociada a las rotaciones, sea un múltiplo entero de $\hbar = h/(2\pi)$, la constante de Planck reducida, que se obtiene dividiendo h entre 2π , con $\pi = 3,14\dots$, un factor que nos resulta familiar pues relaciona el radio con la longitud de una circunferencia. El momento angular orbital es proporcional al radio de la órbita y a la velocidad del electrón. Por otro lado, algo que está

COMPORTAMIENTO CORPUSCULAR DE LA LUZ

La similitud entre el comportamiento corpuscular de la luz y el de objetos como por ejemplo bolas de billar se puede apreciar más detalladamente con el ejemplo que sigue a continuación. En la figura 1, la bola 1, con energía E , golpea a la bola 2, en reposo, y sale desviada con energía E' . La fracción de energía E'/E de la bola rebotada depende del ángulo θ con que se desvía, a no ser que su masa sea mucho menor que la de la otra ($m_1 \ll m_2$). Piénsese en lo que ocurriría si contra una bola de billar en reposo lanzamos una pelota de ping-pong en vez de otra bola de billar.

El efecto Compton

En la figura 2, luz con longitud de onda λ (fotones de energía $E=hc/\lambda$) incide sobre un electrón en reposo y sale dispersada con longitud de onda λ' (fotones de energía $E'=hc/\lambda'$). La frac-

ción de energía de la luz dispersada también varía con el ángulo, a no ser que la energía inicial sea mucho menor que la energía del electrón en reposo ($E \ll m_e c^2$). En eso se basa el efecto Compton,

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos \theta) \quad \text{o sea} \quad \frac{\lambda'}{\lambda} = 1 + \frac{E}{E'} = 1 + \frac{E}{m_e c^2} (1 - \cos \theta).$$

Esto confirma que la luz está hecha de fotones, que se comportan como corpúsculos. Notese el papel de la constante de Planck h , que es muy pequeña.

FIG. 1

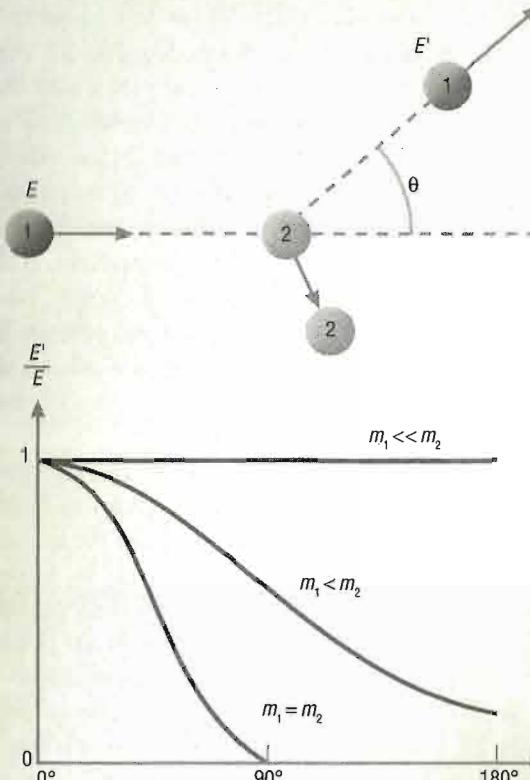
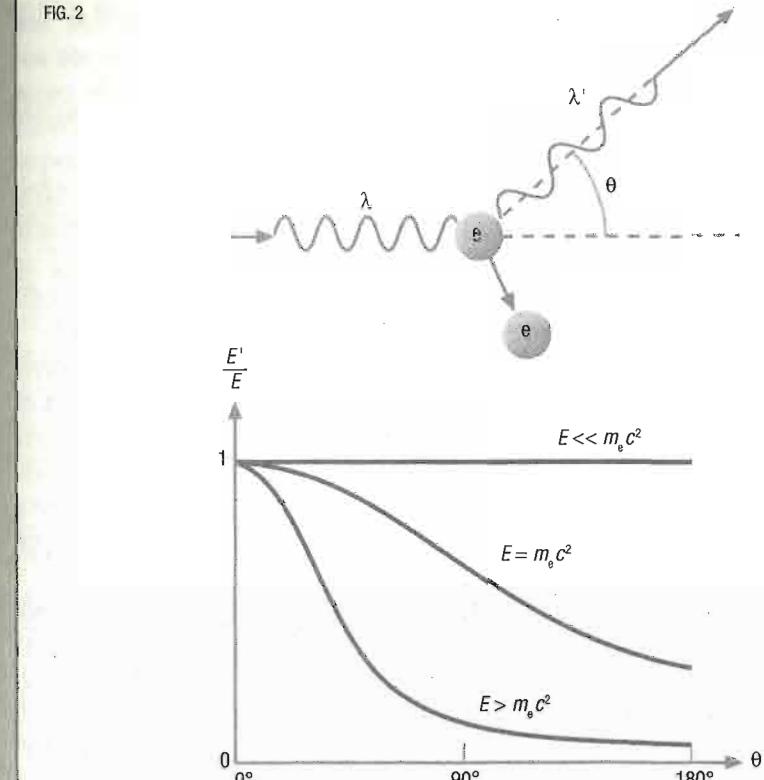


FIG. 2



orbitando lo hace con un radio de giro que depende de su velocidad y por tanto de su energía. Así que la cuantización del momento angular orbital implica que tanto los radios de las órbitas como sus energías, llamadas *niveles*, toman también valores discontinuos. En consecuencia, no es posible que un electrón ceda energía gradualmente, sino solo de golpe, y lo hará emitiendo un fotón o cuanto de radiación de energía $E = h\nu$ igual a la diferencia de energía entre ambos niveles. Esto explica que solamente algunas frecuencias sean posibles, lo que concuerda con las líneas de emisión del átomo de hidrógeno. El término *fotón* para referirse al cuanto de luz fue acuñado por Gilbert N. Lewis en 1926 y deriva del griego *photos*, que significa «relativo a la luz».

Otro ejemplo del comportamiento cuántico de la luz fue descubierto por Arthur Compton en 1923. La luz incidente sobre electrones libres sale dispersada con una longitud de onda que depende del ángulo de dispersión. La explicación del efecto Compton solo es posible si vemos el fenómeno como un choque elástico entre un fotón y un electrón. Igual que cuando una bola de billar choca contra otra en reposo la primera sale rebotada con una velocidad menor cuanto mayor es el ángulo con que se desvía, un fotón sale dispersado con una energía menor (longitud de onda mayor) cuanto mayor es el ángulo de dispersión.

Algo raro estaba ocurriendo. La luz se suele comportar como una onda, pero a veces, como en el efecto fotoeléctrico o en el efecto Compton, se comporta como un corpúsculo. Para mayor confusión, en 1925 Louis-Victor de Broglie propuso que también todo corpúsculo lleva una onda asociada. Así, tanto la materia como la radiación electromagnética tienen doble carácter, lo que se llama *dualidad onda-corpúsculo*.

La hipótesis de De Broglie condujo a Erwin Schrödinger a proponer en 1926 una ecuación para la onda asociada al electrón en una órbita atómica, que de forma natural tenía los mismos niveles discretos de energía que Bohr había postulado, sin justificación. La interpretación física de la «función de onda» del electrón se debe a Max Born, quien en 1930 propuso que esta tiene que ver con la probabilidad de hallar el electrón en un lugar del espacio.

Poco después vino la confirmación experimental del carácter ondulatorio de los electrones. Cuando se superponen dos o más ondas, la suma da lugar a interferencias que pueden ser constructivas o destructivas dependiendo de si se refuerzan o se anulan. La difracción es un fenómeno que se produce cuando una onda encuentra obstáculos o atraviesa rendijas separadas por distancias comparables a su longitud de onda y se debe a la interferencia de las ondas secundarias que se van generando, lo que da lugar a un patrón característico de luces y sombras, llamado *figura de difracción*. Pues bien, en 1929 Clinton Joseph Davisson y Lester H. Germer por un lado y George Paget Thomson por otro, en dos experimentos independientes, observaron la difracción de un haz de electrones, con los patrones de interferencia predichos.

PARTÍCULAS Y ANTIPARTÍCULAS

La ecuación de ondas de Schrödinger no era sin embargo compatible con la teoría de la relatividad, que establece que un objeto tiene como mínimo una energía $E=mc^2$, su energía en reposo. En 1928, Paul Dirac formuló una ecuación de ondas que cumple los requisitos y explica con éxito detalles de la estructura fina de las órbitas electrónicas, debidos a los sutiles efectos relativistas. Al mismo tiempo, la *ecuación de Dirac* introduce en escena dos conceptos importantes: el *espín* del electrón y la existencia de antipartículas.

El espín es otra magnitud relacionada con las rotaciones que tiene las mismas dimensiones físicas que el momento angular orbital pero, a diferencia de este, no se refiere a las rotaciones de un objeto alrededor de un centro de giro externo (órbita), sino a una generalización del concepto de rotación sobre sí mismo, una especie de momento angular intrínseco. En el mundo clásico, una peonza tiene un momento angular no nulo de valor arbitrario, proporcional a su masa, tamaño y velocidad angular, especificado por un vector de tres componentes que expresan la dirección del eje de giro en las tres dimensiones espaciales y el sentido del giro (*regla del sacacorchos*). Sin embargo, resulta

que a nivel cuántico el espín de una partícula solamente puede tomar valores discontinuos $0, 1/2, 1, 3/2, \dots$, en unidades de \hbar , de forma similar, pero no idéntica, al momento angular orbital de un electrón alrededor del núcleo del átomo de Bohr, que ha de ser un múltiplo entero ($1, 2, \dots$) de \hbar . El espín es una propiedad intrínseca de la partícula, como su masa, otra etiqueta que la caracteriza. Se llama *bosón* a cualquier partícula que tenga espín entero $s = 0, 1, 2, \dots$ y *fermión* a cualquiera que tenga espín fraccionario $s = 1/2, 3/2, 5/2, \dots$. Los objetos habituales en el mundo macroscópico contienen trillones de partículas, cuyos momentos angulares orbitales y de espín se combinan, por lo que no percibimos el carácter discontinuo del momento angular total.

Solamente espín 0 y espín 1 tienen análogo clásico, pues para la descripción matemática de un objeto de espín s se necesitan $2s+1$ componentes, que cambian su valor cuando cambiamos la orientación de nuestro sistema de referencia en las tres dimensiones espaciales. Para especificar un objeto de espín 0 basta un número, o *escalar*, pues su estado no depende de la orientación, no hay una dirección privilegiada, como si no girase. Para especificar un objeto de espín 1 se necesitan tres, las tres componentes de un vector, análogas a las que determinan la dirección del eje de giro. Los demás espines son inimaginables y tienen un comportamiento extraño. Por ejemplo, para definir un objeto de espín $1/2$ se usa un *espinor* cuyas dos componentes cambian de signo al girar el sistema 360° y solamente queda como estaba al darle dos vueltas sobre sí mismo.

Pues bien, para que su ecuación de ondas fuera compatible con la relatividad, Dirac se vio obligado a convertir la función de onda del electrón en un objeto de cuatro componentes: dos resultaban tener energía positiva y las otras dos energía negativa. Pero ¿qué es eso de tener energía negativa? Las de energía positiva encajaban con las dos componentes de un electrón de espín $1/2$. Sin embargo, las otras dos correspondían a una partícula con las mismas propiedades, misma masa y mismo espín, pero carga eléctrica opuesta. Para interpretar su significado, inicialmente se supuso que el vacío era como un mar completamente lleno de electrones de energía negativa, que no puede ser ocupado por

ninguno más porque los electrones, por tener espín fraccionario (fermiones), obedecen el principio de exclusión de Pauli que impide que dos fermiones idénticos comparten el mismo estado. Un electrón de energía negativa se interpretó entonces como un «hueco» en el mar de Dirac: la ausencia de un estado de energía y carga negativas $(-E, -e)$ equivale a la presencia de un hueco de energía y cargas positivas $(E, +e)$. Así que cuando un electrón «normal» de energía positiva y carga negativa $(E, -e)$ rellena un hueco, ambos, electrón y hueco, desaparecen liberándose un par de fotones con energía total igual a $2E = 2m_e c^2$, como mínimo, para que la energía del proceso se conserve. La carga eléctrica también se conserva, $e - e = 0$. El hueco es la *antipartícula* del electrón, que hoy llamamos *positrón*.

Poco después de la propuesta de Dirac, en 1932, Carl David Anderson descubrió una partícula con exactamente esas propiedades mientras estudiaba las interacciones de los rayos cósmicos. La *antimateria*, hecha de antipartículas, parece algo de ciencia ficción pero no solo existe sino que hoy se utiliza diariamente en los hospitales donde se realizan *tomografías por emisión de positrones* (PET).

Así que un electrón y su antipartícula pueden *aniquilarse* completamente. Del mismo modo, en sentido contrario, puede crearse un par electrón-positrón, si se dan las condiciones para ello: hacen falta dos fotones muy energéticos con una energía mínima de $E = h\nu = m_e c^2$, en la región del espectro electromagnético que llamamos rayos gamma. Surge por tanto un problema. La función de onda ya no puede relacionarse con la probabilidad de hallar una partícula en un punto del espacio, pues partículas y antipartículas pueden aparecer y desaparecer de repente, con lo que la probabilidad de encontrar una partícula en algún lugar ya no se conserva. Para colmo, resulta que la densidad de probabilidad asociada a la función de onda de Dirac puede tomar valores negativos. Otro sinsentido. Así que hubo que cambiar de nuevo de paradigma.

Mientras tanto, los rayos cósmicos nos fueron obsequiando con nuevas partículas. Del cielo nos llega un flujo incesante de partículas de gran variedad de energías, en menor número las

más energéticas, que al chocar con la atmósfera producen cascadas de otras partículas, y antipartículas, que pueden crearse si en cada colisión hay suficiente energía disponible para producirlas, al menos mc^2 . Al antielectrón siguieron el muon (1937), el pion y el kaon (1947), la partícula lambda (1950) y muchas más, cientos de ellas, cuando aprendimos a fabricar nuestros propios aceleradores y a mejorar las técnicas de detección a partir de los años cincuenta. Un zoo de partículas que no pueden concebirse como fragmentos de los proyectiles que colisionan, pues con frecuencia tienen mayor masa que estos. La mayoría de ellas tienen una *vida media* cortísima, no son estables, sino que se convierten en otras más ligeras, lo que no significa que se deshagan en trozos, pues el proceso consiste en otro intercambio de masa por energía.

No debe sorprendernos que las partículas más pesadas hayan sido las que más ha costado descubrir, pues para «verlas» ha habido que «producirlas», lo que ha requerido energías mayores cuanto mayores son sus masas. Así que la gran variedad de partículas «subatómicas» que hoy conocemos no es exactamente un catálogo de los ladrillos que componen la materia, pues no son realmente «parte» del átomo. Además, no todas son realmente «elementales», palabra que reservaremos en adelante para las que no tienen una estructura interna, ya que muchas resultan ser estados ligados de otras. De la misma forma que los átomos de los distintos elementos químicos son diversas combinaciones de solamente tres partículas, protón, neutrón y electrón, lo que facilita su clasificación y la comprensión de sus propiedades, hemos descubierto que la mayoría de las partículas subatómicas están compuestas de solo unas pocas, entre ellas también el protón y el neutrón. Es evidente que en este intercambio de masa y energía las interacciones entre partículas juegan un papel muy relevante. Para explicarlas, se hizo necesaria la introducción de dos interacciones fundamentales más, que operan a escalas menores al tamaño del núcleo atómico: la *interacción fuerte* y la *interacción débil*.

Nótese que hasta mediados del siglo pasado, la visión microscópica de la materia estuvo siempre dominada por entes localizados e indestructibles que se movían por el vacío sujetos a las leyes de la mecánica, a los que dábamos el atributo de par-

PALOS Y ASTILLAS

Mucho se ha especulado sobre si la inteligencia se transmite genéticamente. Diversas investigaciones científicas avalan que el coeficiente intelectual viene determinado por nuestros progenitores, aunque solo parcialmente, pues se concluye que serán más bien el impulso vital de quienes nos educan, nuestro entorno, el esfuerzo y la constancia los que definirán nuestros logros. Pese a todo, obtener un premio Nobel es el resultado de una genialidad incomparable y no parece casual que existan varios casos de padres e hijos galardonados a lo largo de la historia.

Excelencia familiar

En el ámbito de la física, el caso más curioso es el de los Thomson (Joseph J. Thomson y George P. Thomson). El padre descubrió el electrón y propuso uno de los primeros modelos atómicos basados en su carácter corpuscular. Su hijo fue premiado por un trabajo que demostraba que en determinadas condiciones los electrones se comportan como ondas, no como partículas. Un «conflicto generacional» muy fructífero para el desarrollo de la física de partículas. Otros dos casos son el de los Bragg (William H. Bragg y William L. Bragg), que compartieron el Nobel por su descubrimiento de la difracción de los rayos X, y el de los Bohr (Niels Bohr y Aage Bohr), galardonados por sus trabajos sobre la estructura del átomo y del núcleo, respectivamente. Por su parte, Marie Curie ganó dos premios Nobel, de física y de química, mientras que su hija Irène obtuvo el de química junto con su marido, Jean Frédéric Joliot.



En la fotografía de la izquierda, Niels y Aage Bohr, padre e hijo, ganadores de premios Nobel. A la derecha, Marie Curie y su hija Irène Joliot-Curie, también galardonadas.

tículas, mientras que la luz, o la radiación electromagnética en general, consistía en las oscilaciones de un campo, un concepto novedoso que había sido introducido unas pocas décadas antes, con propiedades bien distintas: deslocalización, superposición, interferencia. El campo actuaba como el transmisor de la fuerza, una competencia que nada tenía que ver con la misión de las partículas, constituyentes de la materia.

La tradición mecanicista estaba tan arraigada que, a pesar de que la ecuación de Schrödinger era una ecuación de ondas, a la nueva teoría se la llamó *mecánica cuántica* y a sus soluciones, las funciones de onda, se las asoció con la probabilidad de encontrar una partícula. Sin embargo, esta visión falla cuando intentamos compatibilizar la teoría cuántica con la relatividad. Por otro lado, la teoría cuántica de la luz era desde el principio una teoría relativista. El origen del carácter dual onda-corpúsculo del fotón estaba bastante claro, pues este no es otra cosa que el cuanto de un objeto extenso, el campo electromagnético. Las ecuaciones de Maxwell, en el vacío, son las ecuaciones de onda de un campo y cada fotón un paquete de energía de ese campo.

Lo natural es entonces interpretar también las soluciones de la ecuación de Dirac como configuraciones de un campo, cuyos modos de oscilación están cuantizados y pueden ser de dos clases, «partícula» y «antipartícula», que así adquieren un nuevo significado. Todos los electrones y positrones del universo son excitaciones de un mismo campo. Y hay un campo para cada partícula conocida. Los campos responsables de las interacciones tienen simplemente propiedades distintas, pero también tienen sus cuantos, que se comportan como partículas y antipartículas. La física de partículas, que estudia la materia y sus interacciones, es hoy en día una *teoría de campos cuánticos*.

No son partículas sino campos

Para comprender qué son las partículas elementales hemos de conocer las ideas básicas que hay detrás de los dos pilares de la física moderna, la teoría de la relatividad y la teoría cuántica. Uniendo ambas tendremos que aceptar que los ingredientes fundamentales del universo no son partículas y fuerzas sino campos cuánticos.

Tenemos una noción intuitiva de masa y energía que se ha forjado en un contexto no relativista, en el que ambas cosas son completamente diferentes: la masa tiene que ver con el peso y la energía con la capacidad que tiene algo para realizar un trabajo. Así, decimos que un cuerpo tiene mucha masa si es muy pesado y hasta solemos expresar el peso en gramos, que es una unidad de masa. Y decimos que una cosa tiene mucha energía si es capaz de propulsar, calentar o iluminar algo, por poner tres ejemplos. Tenemos asociada la energía al movimiento: el calor es agitación térmica y la energía de un haz de luz se nos antoja muy alta debido a que esta se mueve muy rápido, como sucede con un chorro de agua.

Respecto a la masa, sabemos que se puede medir con una balanza, que no marca otra cosa que la fuerza gravitatoria que ejerce la Tierra sobre ella. La gravedad atrae a todos los cuerpos con una fuerza proporcional a la masa de estos, siempre que estén situados, aproximadamente, a la misma distancia del centro de nuestro planeta. Está claro que la masa es una propiedad del cuerpo, independiente de dónde lo coloquemos. Sin embargo, alejado de la gravedad de cualquier astro, un cuerpo no pesará

nada. En tal caso, ¿podemos todavía medir su masa?, ¿hay algún efecto que distinga si tiene mucha o poca masa?

La respuesta es sí. Esto es algo que hemos experimentado muchas veces y Newton formuló en su *segunda ley de la dinámica*: cuando aplicamos una fuerza a un objeto este adquiere una aceleración dada por $F = m \cdot a$, es decir, fuerza igual a masa por aceleración. Recordemos que la aceleración es el incremento de velocidad por unidad de tiempo. Por ejemplo, si pasa de 0 a 3 m/s (metros por segundo), o bien de 5 a 8 m/s, en 3 segundos, su aceleración en ambos casos es de $3/3 = 1 \text{ m/s}^2$. Entonces, si queremos empujar una cosa muy pesada, como un trineo que pueda deslizarse sobre el hielo sin rozamiento o un objeto flotando ingravido en el espacio, nos costará el doble de esfuerzo si su masa es el doble de grande. Por tanto, la masa no solo tiene que ver con el peso de un cuerpo, también es la *inercia* que se necesita vencer para cambiar su estado de movimiento. Una vez que dejamos de empujar, en ausencia de fuerzas, el objeto se sigue moviendo con la misma velocidad que tuviera en ese instante, de acuerdo con la *primera ley de Newton*.

La energía es un concepto algo más escurridizo. Realizando un trabajo, al trineo o al objeto ingravido de antes les hemos comunicado energía, una magnitud que no se crea, ni se destruye, solo se transforma, como bien dice la cantinela. En este caso, la energía del empujón, que residía en nuestros músculos o en el combustible del cohete, se ha transformado en *energía cinética* del objeto que ahora se mueve, o se mueve más rápido. Nótese que, además de la intensidad de la fuerza, también importa a lo largo de qué distancia la hemos aplicado, pues empujar un coche dos metros cuesta el doble de energía que hacerlo solo uno. El trabajo es literalmente fuerza por distancia.

En todo esto, la masa actúa como un lastre, pues está claro que si movemos un objeto comunicándole cierta energía alcanzará una velocidad menor cuanto mayor sea la masa. Y si en ausencia de fuerzas externas añadimos masa a un cuerpo en movimiento, su velocidad disminuirá a la mitad si su masa se multiplica por cuatro. Por ejemplo, si echamos arena a un vagón que se desplaza sin rozamiento sobre raíles horizontales tras un empujón

initial, su velocidad irá disminuyendo mientras va aumentando su masa manteniendo constante la energía cinética $1/2 mv^2$.

Supongamos ahora que el objeto móvil a velocidad uniforme es un tren. Un pasajero a bordo que no mira por la ventanilla no nota que se encuentra en movimiento respecto a la vía. Tiene derecho a considerarse a sí mismo un observador en reposo. En esto consiste el *principio de relatividad*, que ya era conocido por Galileo y que Einstein convirtió en el primer postulado de su teoría: no hay ningún experimento que permita distinguir reposo de movimiento para un observador no acelerado. Otro observador fijo respecto a la vía diría que en realidad es él quien se encuentra en reposo, a pesar de que sin notarlo viaje con la Tierra por el espacio a unos 30 km/s alrededor del Sol, que a su vez se mueve vertiginosamente con nuestra galaxia y así sucesivamente. Un cuerpo en órbita, como la Tierra alrededor del Sol o este dentro de la galaxia, está en caída libre, no siente la aceleración de la gravedad.

Por tanto, estar en movimiento uniforme es algo relativo, una cuestión de punto de referencia. Un observador es un *sistema de referencia*, que asigna coordenadas espaciales y temporales a todo lo que ocurre. Nótese que las primeras no serán las mismas para dos observadores en movimiento relativo. Por ejemplo, si hay una pelota parada en el suelo del tren, digamos en un extremo del vagón, un pasajero dirá que esta se localiza a una distancia x fija respecto a él, pero para un observador situado en un punto fijo de la vía la pelota se encuentra a una distancia $x' = vt + x$ variable, que va aumentando con el tiempo según se aleja el tren con velocidad v . Si ahora la pelota se mueve por el suelo del vagón, recorriendo la distancia x que le separa del extremo del vagón en un tiempo t , es decir, con velocidad $v_1 = x/t$ según el pasajero, entonces lo hará con velocidad $v_2 = x'/t = v + v_1$ para el observador fijo en la vía. Las velocidades se suman. Es lo que esperábamos.

Sin embargo, el razonamiento anterior no sirve si cambiamos la pelota por un rayo de luz. Si para el pasajero la luz va a velocidad $v_1 = c$ entonces para el observador en la vía tendría velocidad $v_2 = v + c$. Esto no cuadra con la evidencia experimental de que la luz viaja siempre a la misma velocidad, aunque sea emitida por

una fuente en movimiento. Einstein tuvo la osadía de cambiar las leyes de la mecánica para reconciliarlas con este misterioso fenómeno, proponiendo una idea revolucionaria. Aceptemos como segundo postulado que *la luz siempre viaja a velocidad c*. Entonces, tanto las coordenadas espaciales como las temporales asignadas a un suceso por dos observadores en movimiento relativo uniforme tienen que ser diferentes. En particular, el tiempo que tarda la pelota, o el rayo de luz, en hacer cualquier recorrido es distinto para el reloj del pasajero, que hemos llamado t , y para un reloj fijo en la vía, que llamaremos t' . Increíble, pero cierto.

¿Cómo han de transformarse las coordenadas espaciales y temporales que a un mismo suceso asignan dos observadores para que la velocidad de la luz que midan sea la misma?

Estamos acostumbrados a las traslaciones y rotaciones, que cambian las coordenadas espaciales manteniendo una cantidad invariante. Si trasladamos o giramos una regla apoyada sobre una mesa, cambiarán en general ambas coordenadas, (x_1, y_1) y (x_2, y_2) , de dos puntos cualesquiera de la regla, respecto a un punto de referencia fijo en la mesa. Si llamamos $x = x_2 - x_1$ e $y = y_2 - y_1$ entonces las coordenadas transformadas x' e y' serán distintas, pero la separación entre esos dos puntos será la misma.

Pues bien, llamemos t y x a las coordenadas espacio-temporales de un suceso medidas por un observador, donde la primera es la hora y la segunda el lugar en que este ocurre. Otro observador que ve al primero alejarse con velocidad constante v asignará coordenadas distintas, t' y x' , al mismo suceso. Podemos suponer que ambos observadores coinciden en el mismo lugar a una cierta hora, que tomamos como origen común de coordenadas. En nuestro ejemplo de antes, hemos supuesto que el pasajero del tren pasa exactamente por donde está el observador fijo en la vía en el momento de poner en marcha sus respectivos cronómetros. Habíamos dado por evidente que el tiempo transcurrido desde ese instante hasta que la pelota alcanza el extremo del vagón es el mismo para ambos, $t = t'$, si bien obviamente las distancias recorridas según cada uno son distintas, x para el pasajero y $x' = vt + x$ para el observador en la vía. Esto había conducido a un resultado inaceptable, pues si en vez de una pelota es un rayo de luz, al di-

TRANSFORMACIONES DE LORENTZ

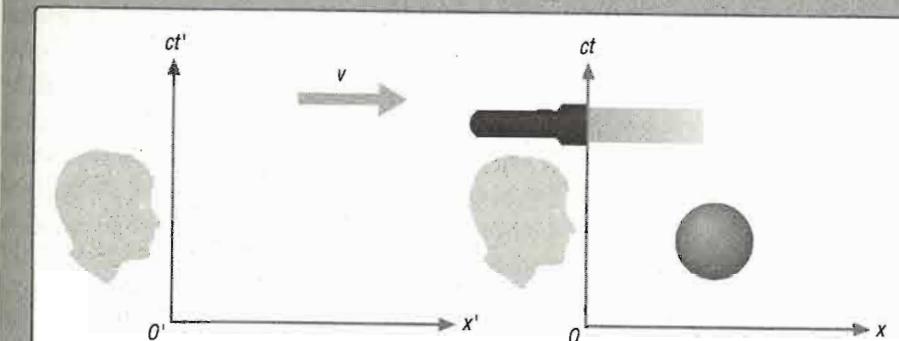
Un observador O y otro O' , que se mueve a velocidad v respecto al primero, asignarán a un mismo suceso coordenadas temporales y espaciales distintas, (ct, x) y (ct', x') respectivamente, que están relacionadas mediante las transformaciones de Lorentz:

$$ct' = \gamma ct + \gamma \beta x \quad x' = \gamma \beta ct + \gamma x$$

donde $\beta = v/c$, c es la velocidad de la luz, y $\gamma = 1/\sqrt{1-\beta^2}$ es el llamado factor de Lorentz. Se puede tomar una raíz cuadrada con una calculadora de bolsillo, pero si β es muy pequeño conviene usar la aproximación $\gamma = 1 + 1/2\beta^2$, pues de lo contrario la calculadora dará siempre $\gamma > 1$. Si para el pasajero de un tren, O , la luz recorre una distancia x en un tiempo t tal que $x = ct$, para un observador fijo en la vía, O' , el mismo rayo de luz recorre una distancia x' en un tiempo t' , que sustituyendo da también $x' = ct'$. Si en vez de un rayo de luz es una pelota, que recorre una distancia x en un tiempo t con $x = vt$, para el observador fijo en la vía recorrerá una distancia x' en un tiempo t' , donde ahora el cociente $v_2 = x'/t'$ resulta

$$v_2 = \frac{v + v_1}{1 + \frac{vv_1}{c^2}}.$$

Habitualmente, pelotas, trenes y objetos macroscópicos se mueven con velocidades mucho menores que c . Nuestra intuición nos dice que aproximadamente $v_2 = v + v_1$, porque en tales casos el cociente vv_1/c^2 es prácticamente cero. Pero a velocidades comparables con la de la luz esta aproximación falla, y para $v_2 = c$ la fórmula correcta da $v_2 = c$. Como queríamos.



Los observadores O y O' se están alejando el uno del otro. Si asumimos que O' está quieto, entonces es O quien se desplaza hacia la derecha de la imagen, con una velocidad v , y en la dirección indicada por la flecha. O y O' observan un mismo suceso, por ejemplo una pelota en movimiento o un rayo de luz emitido por una linterna. Pero cada uno lo observa desde su propio marco de referencia (representado con un eje vertical y otro horizontal), por lo cual le asignarán coordenadas temporales y espaciales distintas.

vidir estos espacios recorridos según cada uno entre los mismos tiempos para los dos obtenemos que la velocidad de la luz medida por cada uno sale distinta, contradiciendo lo que ocurre en la realidad. Inevitablemente tienen que cambiar también los tiempos.

Buscamos una transformación de las distancias recorridas y los tiempos invertidos tal que, si estos son los correspondientes a un rayo de luz, ambos observadores lo vean viajar con la misma velocidad $c = x/t = x'/t'$. A estos cambios de coordenadas se les llama *transformaciones de Lorentz* y en ellas se combinan distancias e intervalos de tiempo, que no tienen las mismas dimensiones. Por eso siempre aparecerá el tiempo multiplicado por la velocidad de la luz c , que es una constante universal, para dar una longitud. Por ejemplo, un tiempo de un segundo corresponde a una distancia de 300 000 km, o directamente un segundo-luz. Así todas las coordenadas (ct, x) de un suceso en el *espacio-tiempo* tienen las mismas dimensiones.

Si la velocidad relativa entre ambos observadores, v , es mucho menor que c , ambos miden los mismos intervalos de tiempo, $t' = t$, y se recupera $x' = vt + x$, como habríamos esperado usando nuestra intuición prerrelativista. De lo contrario, obtenemos que el tiempo pasa a distinto ritmo para ambos observadores. En efecto, supongamos que la pelota rebota regularmente con el ritmo del tic tac del reloj del pasajero del tren, cada $t = 1$ segundo, sin moverse de $x = 0$. Entonces las transformaciones de Lorentz nos dicen que $t' = \gamma t$, es decir, por cada segundo para el pasajero pasan γ segundos para el observador fijo en la vía, donde $\gamma = 1/\sqrt{1 - \beta^2}$ es el factor de Lorentz y $\beta = v/c$. Por ejemplo, si $\beta = 4/5$, es decir, $v = 240 000$ km/s, el factor de Lorentz es $\gamma = 5/3 = 1,67$. Esta es la famosa *dilatación temporal*. Nótese que si v se va acercando a $c = 300 000$ km/s, el factor de Lorentz se va haciendo cada vez mayor, infinitamente si $v = c$.

La clave de la universalidad de la velocidad de la luz está en que la cantidad $(ct)^2 - x^2 = (ct')^2 - (x')^2$ es la misma para cualquier observador. Esta cantidad se llama *intervalo invariante*, una especie de distancia espacio-temporal entre dos sucesos. Igual que bajo una rotación en el plano las coordenadas espaciales de un punto (x, y) se transforman a (x', y') manteniendo invariante

la cantidad $x^2 + y^2 = (x')^2 + (y')^2$, que es el cuadrado de la distancia al centro de giro, bajo una transformación de Lorentz las coordenadas espacio-temporales de un suceso (ct, x) cambian a (ct', x') dejando invariante el intervalo. El intervalo se llama nulo o tipo luz cuando vale cero, y es el correspondiente a dos sucesos separados por un rayo de luz.

Debemos revisar ahora el concepto de energía. Vamos a desvelar el profundo significado de la más célebre fórmula de Einstein, $E = mc^2$. De la misma forma que «dónde» y «cuándo» ocurre algo constituyen las coordenadas espacio-temporales de un suceso, cuyos valores se transforman de un observador a otro manteniendo invariante el intervalo. Einstein propuso que la energía y el momento lineal son las componentes de otro «vector» en el espacio-tiempo, una magnitud con dirección y sentido, que expresa «cuánta» energía porta un objeto y «hacia dónde» se desplaza esa energía, respectivamente. El llamado *cuadrimomento* tiene componentes $(E, pc, 0, 0)$, si se elige el eje x en la dirección del movimiento. Obviamente, energía E y momento p no son cantidades invariantes, pues para un observador que vea un objeto en movimiento este tiene más energía y momento que para otro que lo vea en reposo. Pero ambas componentes se transformarán de un observador a otro como lo hacen las coordenadas espacio-temporales (ct, x) .

Igual que con el intervalo, construimos ahora una cantidad asociada al cuadrimomento que valga lo mismo para cualquier observador. Esa cantidad invariante es lo que llamamos masa, concretamente $E^2 - (pc)^2 = (E')^2 - (p'c)^2 = (mc^2)^2$. De nuevo hemos multiplicado por potencias de la constante universal c , pues energía, momento y masa no tienen las mismas dimensiones. La energía tiene dimensiones de masa por velocidad al cuadrado. Recuérdese, por ejemplo, la expresión de la energía cinética. Y el momento tiene dimensiones de masa por velocidad.

Vemos que en reposo un objeto de masa m tiene ya energía $E = mc^2$, pues su momento es $p = 0$. Pero para un observador que lo vea en movimiento, con velocidad $v = \beta c$, el objeto tendrá mayor energía, la que tenía en reposo más una energía cinética adicional, y un momento no nulo. Concretamente, aplicando las

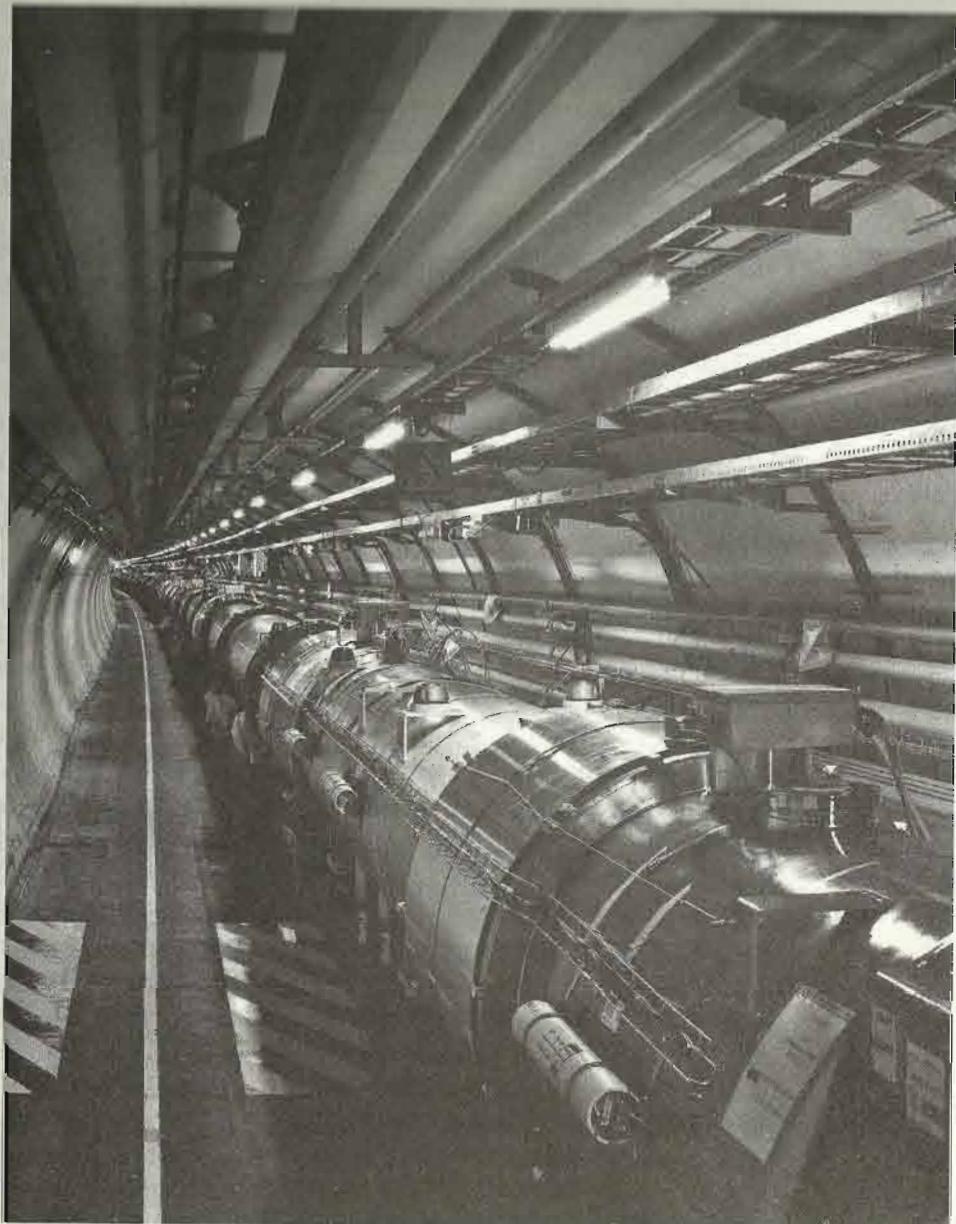
transformaciones de Lorentz, $E' = \gamma m c^2$ y $p' = \gamma \beta m c$. Entonces la diferencia entre su energía en movimiento y en reposo, es decir, su energía cinética es $K = E' - E = (\gamma - 1) mc^2$.

Conviene enfatizar que la masa es energía, expresada en las unidades apropiadas: hay que multiplicarla por la velocidad de la luz al cuadrado, lo que aun para una masa muy pequeña da una cantidad enorme. Cuando en adelante comparemos la energía de un objeto, una partícula o un cuanto, con su masa, lo haremos teniendo en cuenta que ambas deben expresarse en las mismas unidades. Así por ejemplo, una bala de 50 g a 300 m/s, o sea, $\beta = 0,000001$, tiene una energía cinética letal, aunque muchísimo menor que su masa mc^2 , pues un sencillo cálculo da $\gamma = 1,000000000005$. Prácticamente toda la energía de la bala está en su masa, pero solamente una pequeñísima fracción, su energía cinética, es transferida al chocar con el blanco. En cambio, en el LHC (el Gran Colisionador de Hadrones; véase la fotografía de la página contigua), un protón, que tiene una masa diminuta de $1,6 \cdot 10^{-24}$ g, viaja a casi la velocidad de la luz, $\beta = 0,99999999$, con una energía cinética muchísimo mayor que su masa, concretamente $(\gamma - 1) mc^2$ con $\gamma = 7000$, casi igual a su energía total. Se trata de una energía cinética enorme para un objeto microscópico, pero insignificante a escala macroscópica, pues es equivalente a la de un mosquito volando.

Se dice a veces que la masa de un objeto se dilata un factor γ cuando lo observamos en movimiento. Pero no es así. La masa m que hemos introducido es una cantidad invariante. En realidad es la energía total del objeto, γmc^2 , la que aumenta cuando este se mueve. El cociente entre la energía total y la energía en reposo, mc^2 , es precisamente el factor de Lorentz γ .

Habitualmente no tenemos en cuenta la energía en reposo, solamente nos fijamos en la energía cinética y además suponemos que esta vale $1/2 mv^2$ y el momento mv . Sin embargo, veremos que eso solo funciona bien para objetos *no relativistas*, que se mueven despacio en comparación con la velocidad de la luz, pero no sirve en general, y mucho menos para la luz misma.

Fíjémonos en que el factor de Lorentz γ va creciendo con la velocidad. Si esta es mucho menor que c entonces aproximada-



Un sector del túnel del LHC.

mente $\gamma - 1 = \frac{1}{2}\beta^2$ y $\gamma\beta v = v$, con lo que recuperamos los valores de energía cinética y momento antes citados, pues en ese caso

$$K = (\gamma - 1)mc^2 = \frac{1}{2}\beta^2 mc^2 = \frac{1}{2}mv^2 \quad y \quad p^1 = \gamma\beta mc = mv.$$

Pero, si vamos aumentando la velocidad del objeto, ambas crecen mucho más de lo que esperaríamos conforme v se va acercando a c , pues γ es infinitamente grande si $v = c$, lo que significa que si queremos que un objeto alcance la velocidad de la luz hay que darle una energía infinita. Por tanto, la velocidad de la luz es una velocidad límite, insuperable.

Entonces, ¿cómo es que la luz puede viajar a c y de hecho va siempre a esa velocidad? La energía mínima que puede tener un objeto de masa m es su energía en reposo, cuando la velocidad es cero. Pero si el objeto tiene masa cero la velocidad es siempre $v = c$, es decir, $\beta = 1$, independientemente del valor de su energía. Dicho de otra manera, si el objeto tiene masa, por pequeña que ésta sea, es imposible que llegue a alcanzar la velocidad de la luz, pero si su masa es cero entonces es imposible que vaya a una velocidad que no sea la de la luz.

Ya se ha dicho antes que la luz está hecha de paquetes o cuantos de energía llamados fotones. Pues bien, los fotones son pura energía, no tienen masa. Por eso no es posible verlos en reposo, ni adelantarlos, ya que cualquier observador los ve a velocidad c . Por más energía que tenga la luz, siempre va a la misma velocidad. Imaginemos una fuente luminosa que emite un rayo de luz con energía E , por tanto con momento $p = E/c$, hacia un observador que ve acercarse la fuente con velocidad $v = \beta c$. Podemos usar de nuevo las transformaciones de Lorentz para hallar la energía E' que tiene la luz que recibe, $E' = \gamma(1+\beta)E$, que es mayor que E . Si en cambio la fuente se aleja, esta se mueve en sentido contrario al rayo de luz por lo que debe cambiarse β por $-\beta$ y obtenemos que la energía de la luz recibida es menor, $E' = \gamma(1-\beta)E$. Recordemos que en general la luz emitida se descompone en ondas electromagnéticas de distintas frecuencias v y cada una de ellas son fotones de ener-

gía $E = h\nu$, que se reciben con energía $E' = h\nu'$, así que el cambio de energía se manifiesta en un cambio de frecuencia, lo que se conoce como *efecto Doppler*. Por tanto un haz de luz es más energético cuantos más fotones tenga, mayor sea la intensidad lumínosa y mayor sea la frecuencia de estos. No tiene nada que ver con su velocidad.

Armados con la teoría de la relatividad, ya podemos comprender algunos fenómenos curiosos pero perfectamente normales que iremos descubriendo en el mundo subatómico. Estamos acostumbrados a procesos en los que la masa se conserva. Cuando un vaso se rompe en mil pedazos, la suma de todos los trozos tiene una masa idéntica a la del vaso original. También en una reacción química la masa de los reactivos es igual a la de los productos, de acuerdo con la *ley de Lavoisier*. Sin embargo, esto solo es cierto mientras las energías puestas en juego sean mucho menores que las energías en reposo de los fragmentos que intervienen. En un proceso que sea mucho más energético que el golpe que se lleva el vaso e incluso que la energía liberada o absorbida en una reacción química las cosas son muy diferentes. Lo que realmente se conserva es cada componente del cuadrimomento, es decir, la energía y el momento, calculados con las expresiones relativistas.

Pongamos números. Si dejamos caer al suelo un vaso desde una altura de un metro le estamos comunicando una energía igual a la diezmilbillonésima parte, 10^{-16} , de su energía en reposo, o sea, de su masa, mc^2 . Por otro lado, la energía puesta en juego en una reacción química es la diferencia entre la necesaria para romper y formar enlaces, siendo esta positiva o negativa si la reacción es exotérmica o endotérmica, respectivamente. Pero, los elementos químicos antes y después de una reacción son siempre los mismos agrupados en diferentes moléculas, como las piezas de un rompecabezas, que simplemente se han intercambiado. En la combustión del hidrógeno para dar agua, $H_2 + 1/2 O_2 \rightarrow H_2O + \text{calor}$, por poner un ejemplo, la energía de reacción es del orden de la diezmilmillonésima parte, 10^{-10} , de la energía en reposo, mc^2 , de dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno. Como las «piezas» son las mismas, la conservación

de la energía en este proceso se manifiesta en la emisión de calor, que es la energía de la reacción, la diferencia de energía extra del sistema que no está en la masa de las piezas.

Sin embargo, la energía de las partículas que chocan contra un blanco fijo o contra otro haz de partículas viajando en sentido contrario en *colisionadores* es habitualmente muy superior a su energía en reposo, unas 7000 veces mayor en el LHC. Y aún mayor en el caso de los rayos cósmicos (electrones, protones y núcleos procedentes del espacio exterior) que bombardean la Tierra con energías hasta siete órdenes de magnitud superiores, un factor 10^{10} . En estos casos la energía puesta en juego es tan grande comparada con las masas de las partículas intervenientes que la conservación de la energía puede conllevar mucho más que un intercambio de piezas del rompecabezas, pues estas pueden llegar a destruirse totalmente y crearse nuevas piezas, que pueden tener incluso masas mayores que las originales, siempre que la energía total se conserve. Es decir, la energía puede transformarse en masa.

En los reactores nucleares de fisión se da el fenómeno contrario. Al ser golpeado por un neutrón lento, cada núcleo de uranio se fragmenta en trozos (neutrones y otros núcleos más ligeros) produciéndose una reacción en cadena en la que, a cada paso, los productos tienen una masa alrededor de un 0,1% menor que el núcleo original. La diferencia de masa, multiplicada por c^2 , es una energía mucho mayor que la liberada en una reacción química, que emitida tanto en forma de radiación electromagnética como de energía cinética de los fragmentos de la fisión se usa para calentar un líquido circundante, el cual alcanza una enorme presión y hace girar una turbina con la que se produce electricidad. En este caso la masa se transforma en energía.

Así que masa y energía son intercambiables. La masa no solamente es un lastre, pues cuanta más masa tenga un cuerpo a igualdad de energía más lentamente se mueve. Además, es una especie de *energía cristalizada*, la que tiene en reposo, que se puede transferir en un proceso siempre que se conserve la energía total. Pero también hay objetos sin masa, pura energía, que como los fotones viajarán siempre a la velocidad de la luz.

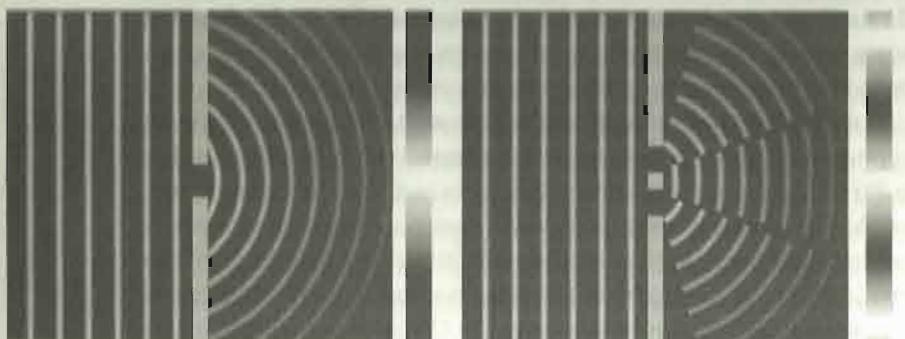
LA INCERTIDUMBRE CUÁNTICA

El mundo se nos muestra bastante peculiar cuando lo observamos a grandes velocidades, pero resulta mucho más extraño, incluso absurdo, cuando profundizamos en sus entrañas.

Ya se ha dicho que mientras Einstein se hallaba elaborando su revolucionaria teoría de la relatividad, apareció la teoría cuántica de Planck, que propone descomponer la radiación electromagnética, la luz, en paquetes o cuantos de energía mínima, los fotones. Por aquella época, la idea de átomo indivisible también se había venido abajo, al descubrirse partículas subatómicas, primero el electrón y luego el protón y el neutrón. Como si del doctor Jekyll y *mister Hyde* se tratara, la luz tiene doble personalidad: se manifiesta unas veces como las ondas en un estanque, que pueden regenerarse, expandirse e interferir al toparse con un obstáculo, y otras como corpúsculos, que al golpear electrones rebotan con distinta energía según la dirección en la que salen despedidos, como sucede cuando una bola de billar choca contra otra.

Esta dualidad onda-corpúsculo resultan tenerla también los electrones, que revelaron su faceta ondulatoria en experimentos de difracción llevados a cabo a finales de la década de 1920: un haz de electrones monoenergéticos es dispersado al atravesar un cristal de níquel y es recogido en una pantalla fluorescente donde los impactos muestran el mismo tipo de patrón de interferencias que exhibiría un haz de luz difractada: zonas claras con muchos impactos y otras oscuras sin apenas impactos. Antes de analizar las implicaciones de tan importante hallazgo vamos a describir sus aspectos fundamentales. Para ello utilizaremos una versión simplificada pero análoga: el *experimento de la doble rendija*.

Imaginemos que producimos ondas en un estanque cuyo frente plano avanza en línea recta hacia una barrera con una o dos rendijas, como en la figura 1. De acuerdo con el *principio de Huygens*, todo punto alcanzado por una onda se convierte en centro emisor de nuevas ondas, así que el frente avanza hacia delante porque se anula la suma de las ondas secundarias en cualquier otra dirección. Pero cuando este alcanza los bordes de una rendija ya no se dan las cancelaciones en ciertas direc-



Olas en un estanque que atraviesan una rendija (izquierda) o dos (derecha), junto con una escala que indica la intensidad de las olas en el borde opuesto del estanque (más claro cuanto mayor oleaje). Las pequeñas olas se mueven de izquierda a derecha. Las rendijas están en el centro de cada imagen.

ciones y el resultado neto es un frente de onda circular (ya no se propaga solamente en la dirección que traía) tanto más abierto cuanto más estrecha es la rendija comparada con la separación entre las olas, es decir, la longitud de onda. Este es el fenómeno de la difracción, que es propio de cualquier onda, incluida la luz. Habitualmente la luz no «dobra las esquinas», porque su longitud de onda es muy corta, menos de una micra, por lo que hacen falta orificios u obstáculos muy pequeños para observar este fenómeno. Sin embargo, la longitud de onda del sonido de la voz humana en el aire es del orden de unos centímetros, así que la difracción facilita que oigamos una conversación tras una puerta o una ventana aunque no estemos en línea con el interlocutor.

Podemos medir la amplitud de las olas del estanque colocando una boya en cada punto de su superficie y tomar la intensidad del oleaje en cada uno de ellos como el cuadrado de la amplitud de la oscilación, por analogía con la intensidad de un sonido. En la figura 1, para una y dos rendijas, se muestra una imagen de la amplitud de las olas en un instante determinado y se representa su intensidad en el otro extremo del estanque mediante una escala dibujada en una banda vertical a su lado.

Si abrimos solo una rendija, las olas pasan alcanzando la pared del otro lado del estanque, principalmente en una zona situada justo enfrente. Si en cambio las olas pasan por dos rendijas separadas por una distancia similar a la longitud de onda, se generan esencialmente dos frentes de ondas circulares partiendo de las rendijas, que al avanzar por el otro lado del estanque se superponen, interfiriendo en cada punto. En la figura se intuye que hay ciertas zonas del estanque en las que la interferencia es siempre destructiva. Para verlo, habría que mostrar toda la película, no solo este fotograma. El registro de la intensidad del oleaje en la pared de la derecha nos muestra ahora zonas fijas de máximos y mínimos alternantes.

En vez de olas en un estanque usemos ahora un haz de luz monocromática coherente que incide sobre una barrera opaca con dos rendijas muy estrechas. En un haz coherente, como un láser, todas las ondas oscilan acompasadamente, en fase. La luz que pasa al otro lado ilumina una pantalla situada enfrente. En ella observaremos zonas claras y otras oscuras alternantes, debidas a las interferencias, constructivas y destructivas, de las ondas secundarias generadas por cada rendija. La banda vertical de la figura 1 mostraría en este caso el patrón de franjas luminosas que vemos en la pantalla. La separación entre las rendijas debe ser suficiente para que en la pantalla, situada en este caso relativamente lejos, se puedan apreciar varias franjas, pues de lo contrario se vería solamente la franja central. Un experimento similar fue realizado por Thomas Young en el siglo XIX, poniendo en evidencia el carácter ondulatorio de la luz.

Repetimos de nuevo el experimento lanzando esta vez un haz de electrones sobre el obstáculo con dos rendijas, aún más estrechas. Podemos detectar los electrones que logran pasar registrando sus impactos sobre una pantalla fluorescente. Sorprendentemente, la sucesión de puntitos sobre la pantalla no dibuja dos zonas, las siluetas de ambas rendijas, sino que estos se van acumulando en las franjas de la figura 2, que nos recuerdan los patrones de interferencia de las ondas de los dos casos anteriores. Pero, si los electrones son partículas que van «agujereando» la pantalla, ¿cómo pueden superponerse como si fueran ondas?

Si ahora cerramos una de las dos rendijas, ya no habrá interferencias, no habrá franjas, sino simplemente una delgada zona iluminada, en el caso de la luz, o una fina acumulación de impactos, en el caso de los electrones, que apunta hacia la fuente

pasando por la única rendija abierta. Esto sí era de esperar.

La luz es la forma más refinada de la materia.

LOUIS DE BROGLIE

tículas, moléculas de H_2O , que están en interacción. Para salir de dudas, enviamos entonces los electrones de uno en uno, con las dos rendijas abiertas, esperando que al pasar por una o la otra los impactos se vayan acumulando en la pantalla dibujando dos delgadas franjas, una por cada rendija. Sin embargo, cuando se suceden suficientes impactos, volvemos a observar el mismo patrón de varias franjas de puntitos. Esto es exactamente lo que se hace en el experimento real de la figura 2. ¡Cómo es posible! ¿Cómo puede «saber» un electrón que pasa por una rendija si la otra está abierta o cerrada? Y cuando están las dos abiertas, ¿cómo puede un solo electrón «interferir» con otro emitido antes o después que este? Por cierto, también se ha hecho la experiencia de enviar por las dos rendijas un haz de luz tan tenue que solo consiste en un fotón de vez en cuando, y resulta que estos van impresionando punto a punto una placa fotográfica ultrasensible con el mismo patrón de franjas. ¡El electrón interfiere consigo mismo y el fotón también!

Parece que tenemos que admitir que los electrones se comportan como ondas, pero ¿ondas de qué? ¿Acaso pasa un solo electrón por las dos rendijas a la vez? Louis de Broglie propuso asociar una onda a cualquier corpúsculo, de longitud de onda $\lambda = h/p$, donde el momento lineal es $p = mv$, si este no es relativista, y Schrödinger encontró una ecuación de ondas para los electrones de la corteza atómica cuyas soluciones, las funciones de onda, tienen los mismos niveles discontinuos de energía que el átomo de Bohr. De hecho, los electrones de cada nivel de energía tienen asociadas ondas estacionarias, pues su longitud de onda

FIG. 2

200 electrones

40 000 electrones

6000 electrones

140 000 electrones

Experimento de Tonomura. Se muestra el efecto generado por 200 electrones, 6 000, 40 000 y 140 000, enviados uno a uno por una doble rendija.

es múltiplo entero de la longitud de la órbita. Los electrones del átomo de Bohr tienen un momento angular orbital cuantizado $L = mvr = n\hbar$, donde $n = 1, 2, \dots$ etiqueta su nivel de energía. Por tanto, la longitud de onda asociada a un electrón de la enésima órbita es $\lambda = h/(mv) = n2\pi r$, un múltiplo entero de la longitud de la órbita, que vale 2π por el radio r . Se trata de longitudes de onda pequeñísimas, incluso menores que las de la luz visible. Por ejemplo, la luz amarilla tiene $\lambda = 580$ nm, mientras que para el electrón de la primera órbita de Bohr, $\lambda = 3,27$ Å, que es la longitud de onda asociada a un electrón viajando a 2200 km/s. El ángstrom, $1 \text{ \AA} = 0,1 \text{ nm} = 10^{-10} \text{ m}$, es la unidad apropiada para distancias atómicas. Otras unidades, útiles cuando se abarca un amplio rango de escalas, se exponen en la tabla de la página siguiente. El radio de la primera órbita de Bohr mide 0,52 Å.

Potencias de 10		
Potencia	Valor	Prefijo
10^{16}	1 000 000 000 000 000	P (peta)
10^{12}	1 000 000 000 000	T (tera)
10^9	1 000 000 000	G (giga)
10^6	1 000 000	M (mega)
10^3	1 000	k (kilo)
10^0	1	
10^{-3}	0,001	m (mili)
10^{-6}	0,000001	μ (micro)
10^{-9}	0,000000001	n (nano)
10^{-12}	0,000000000001	p (pico)
10^{-16}	0,0000000000000001	f (femto)

Debido al enorme rango de escalas que usaremos, conviene introducir una notación compacta en términos de potencias de 10, indicadas mediante un prefijo antes de la unidad de medida correspondiente.

Unidades apropiadas de energía y longitud

Asimismo, las unidades de energía (J, julio) y longitud (m, metro) del Sistema Internacional de Unidades se reemplazan por:

$$1 \text{ eV (electrónvoltio)} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J.}$$

$$1 \text{ \AA (ángstrom)} = 10^{-10} \text{ m.}$$

$$1 \text{ fm (femtómetro o fermi)} = 10^{-15} \text{ m.}$$

La constante reducida de Planck

$$\hbar = 1,054 \cdot 10^{-34} \text{ Js.}$$

Es más fácil recordarla introduciendo la velocidad de la luz c ,

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s.}$$

$$\hbar c \sim 200 \text{ MeV fm.}$$

Pero ¿qué es eso que ondula en el electrón? Born propuso que la función de onda es solo un artificio matemático que expresa la *amplitud de probabilidad* de encontrar el electrón. En el caso análogo de las ondas en el estanque, la función de onda del electrón viene a ser la amplitud de las olas, y la intensidad del oleaje, que es proporcional al cuadrado de la amplitud, sería la *densidad de probabilidad* de encontrarlo en ese punto. Cada vez que hacemos el experimento de disparar un electrón, este se detectará en un solo punto de la pantalla, pero si repetimos muchas veces el experimento, como en la figura 2, el número de electrones que detectaremos es igual al número de electrones disparados por la probabilidad de hallar uno en esa zona. Tampoco las órbitas de Bohr resultan estar bien definidas y debe hablarse de *orbitales*. El radio de la primera órbita de Bohr es en realidad la distancia más probable del electrón del estado de mínima energía al núcleo. La función de onda es una *onda de probabilidad*.

¿Y cómo puede interferir la onda de probabilidad de un solo electrón consigo misma cuando hay dos rendijas? Quizá la respuesta más satisfactoria se debe a Richard Feynman quien en 1948 formuló una interpretación alternativa, totalmente equivalente, de la teoría cuántica que proporciona una nueva forma de visualizar los procesos cuánticos y además permite entender de forma natural el límite clásico. El electrón no atraviesa solamente una de las dos rendijas hasta alcanzar la pantalla, sino las dos a la vez, y no recorre solo la trayectoria más corta que conecta la fuente y el punto en el que impacta sobre la pantalla a través de las rendijas, sino todos los caminos posibles simultáneamente. Se puede decir que el electrón no está en ninguna parte o está en todas, mientras no detectemos por dónde pasa. Lo único que sabemos seguro es que sale de la fuente y llega a la pantalla. Esto tiene profundas consecuencias. Veamos por qué.

Según la teoría clásica, un electrón sigue solamente un camino, el que minimiza una magnitud llamada *acción*, que tiene las mismas unidades que la constante de Planck \hbar y es una medida de la energía puesta en juego. Por ejemplo, si no hay fuerzas externas, el electrón sigue una trayectoria rectilínea y se mueve con velocidad constante. Así, solo puede ir con velocidad uniforme por la

línea recta que conecte fuente y pantalla pasando por una rendija. Cualquier otra opción implicaría una acción mayor, así que nunca lo encontraremos en otro lugar. En cambio, según la teoría cuántica, tenemos que aceptar que el electrón toma cualquier camino. El electrón sigue simultáneamente cualquier trayectoria entre fuente y pantalla a cualquier velocidad en cada momento. Pero, eso sí, hay caminos que están penalizados. Lo que determina cuáles son los más probables tiene que ver con cuánto difiere la acción de su valor mínimo por cada camino. Simplificando, si esa diferencia de acción es comparable a \hbar entonces ambos caminos son probables. Pero si es mucho mayor, el camino que minimiza la acción es mucho más probable. Como \hbar equivale a una acción muy pequeña, solamente hay en la práctica un camino posible para un objeto macroscópico, cuya acción es muchos órdenes de magnitud mayor. En cambio para algo microscópico como un electrón, la acción por varios caminos difiere en una cantidad muy pequeña al pasar por dos rendijas muy juntas. Haciendo las cuentas, es fácil ver que estas deben estar separadas una distancia del orden de $d = \hbar/p$, donde $p = mv$ es la masa por la velocidad de los electrones, la longitud de «onda asociada» al electrón según De Broglie. Esto explica cómo es posible difractar electrones de 150 eV, es decir, $v = 7300$ km/s, usando una red cristalina en la que los átomos están separados por aproximadamente 1 Å, o 10^{-10} m. Si cambiamos electrones por pelotas de tenis a la misma velocidad, cuya masa es 10^{29} veces mayor, entendemos por qué es imposible difractarlas.

Y ahora viene la traca final. En el experimento anterior, se disparan electrones, incluso uno a uno, suponiendo que no se detecta por cuál de las dos rendijas han pasado. Pero si de alguna forma observamos cuál atraviesan, alteramos el resultado del experimento, pues restringimos los caminos posibles, como si hubiera una sola rendija: habrá una delgada franja de impactos en la pantalla frente a cada una de las rendijas. Este increíble fenómeno se ha comprobado experimentalmente. ¡La observación afecta a la medida!

Este es el fundamento del renombrado *principio de incertidumbre* de Heisenberg. Si queremos saber dónde está un objeto, no tenemos más remedio que interactuar con él, y lo menos

agresivo que podemos hacer es iluminarlo, para «verlo», con un solo fotón tan poco energético como sea posible. Pero existe una *correlación inversa* entre la resolución con la que determinamos la posición del objeto y la perturbación que le causamos. La resolución o precisión en su localización es mejor cuanto menor es la longitud de onda del fotón utilizado. La clave está en que un fotón de longitud de onda muy corta tiene una frecuencia muy alta y, según la ley de Planck, una energía muy grande, con lo que inevitablemente propinaremos al objeto un golpe que alterará su posición. Tenemos que aceptar, por tanto, que es imposible conocer con total precisión a la vez posición y momento: si reducimos la imprecisión de la posición (Δx), aumenta la indeterminación del momento (Δp) y viceversa. El producto de ambas es como mínimo del orden de \hbar , concretamente,

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}.$$

Esta incertidumbre es una propiedad intrínseca de la naturaleza, no una limitación de nuestros instrumentos de medida.

Otras dos magnitudes conjugadas, que no pueden conocerse simultáneamente con precisión arbitraria, son la energía de un sistema y el tiempo, es decir el instante, en que ambos se miden. Esto hace posible que durante un intervalo de tiempo suficientemente pequeño (Δt) se produzca una *fluctuación cuántica* en la que el sistema tome «prestada» una cierta cantidad de energía (ΔE), siempre que

$$\Delta t \Delta E \geq \frac{\hbar}{2}.$$

Una consecuencia de esto es lo que se conoce como *efecto túnel*: se puede atravesar una barrera si se logra la energía extra necesaria para superarla en un tiempo suficientemente breve. Otra importante consecuencia son las *partículas virtuales*, que fugazmente pueden incumplir la relación $E^2 - (pc)^2 = (mc^2)^2$, por lo que se dice que están fuera de su «capa de masas». Las partículas virtuales aparecen y desaparecen, siendo intercambiadas entre los estados inicial y final en un proceso de interacción.

Todas las partículas pueden ser virtuales en algún proceso, pero solo unas pocas pueden vivir para siempre. La inmensa mayoría de ellas decaen inmediatamente después de ser creadas, pues son inestables. Una partícula inestable tiene una vida media inversamente proporcional a su *anchura de desintegración*, que es una medida de la incertidumbre en la determinación de su energía. El producto de vida media τ y anchura Γ es \hbar , es decir, $\tau = \hbar/\Gamma$. La «masa» se mide, asumiendo las leyes de conservación, a partir de la energía total E y el momento total p de los productos de la desintegración, cuyo valor en promedio, tras examinar muchas desintegraciones, estará centrado en $mc^2 = \sqrt{E^2 - (pc)^2}$, pero tendrá una imprecisión inevitable del orden de su anchura, Γ , una propiedad intrínseca de la partícula que determina su vida media.

Así, una partícula estable, como el electrón o el fotón, tiene anchura cero por lo que una vez producida puede existir eternamente. En cambio, estrictamente una partícula inestable es siempre una partícula virtual que, tras crearse, decae en promedio en un tiempo del orden de su vida media. Se trata de intervalos muy cortos, aproximadamente dos microsegundos para un muón y muchísimo menos para las demás partículas elementales inestables. La inevitable incertidumbre en la medida de la masa, $\Gamma/(mc^2)$, es inapreciable para un muón, del orden de una parte en 10^{17} , pero muy notoria para otras partículas inestables; por ejemplo, para un bosón Z es del 3%. Esto no quiere decir que no podamos averiguar cuál es la masa de una partícula con una precisión menor que su anchura, sino que al medirla obtendremos cada vez valores distintos, alrededor de un valor central, el valor más probable, con una dispersión típica dada por la anchura. Así por ejemplo, conocemos la masa del bosón Z con un error del 0,02%, porque hemos logrado producir del orden de diez millones de bosones Z y medir su masa en cierto experimento, y hemos obtenido su anchura, con la que deducimos su diminuta vida media, unos 10^{-25} segundos.

Conviene hacer ahora una aclaración importante. El hecho de que al medir un observable sea imposible, en general, saber qué valor vamos a obtener, sino solamente *con qué probabilidad* lo

obtendremos, no significa que la teoría cuántica no sea determinista. Del carácter probabilístico de la predicción es culpable el acto de la medida. La evolución de la función de onda con el tiempo, que especifica el «estado» de la partícula en cada instante, está perfectamente determinada por la ecuación de ondas.

Finalmente, nótese que la incertidumbre cuántica solo se aprecia en el mundo microscópico por una mera cuestión de escalas. Hasta donde sabemos, el mundo se comporta tal cual lo describe la teoría cuántica en todos los dominios, pero la teoría clásica es una excelente aproximación para los fenómenos cotidianos. El hecho de que la constante de Planck sea tan pequeña hace que en los procesos macroscópicos se dé solamente uno de los caminos cuánticos posibles con total probabilidad, lo que en la práctica supone una ausencia total de incertidumbre.

LOS CAMPOS CUÁNTICOS

Hasta ahora hemos tratado al electrón, y por extensión al resto de las partículas subatómicas, como un corpúsculo, un objeto microscópico. En esta categoría hemos incluido también al fotón, aunque este último es en realidad el cuanto de un campo. Es verdad que los fotones se comportan como partículas, pero el hecho de que podamos contarlos y enviarlos uno a uno contra una pantalla no les confiere «necesariamente» la propiedad de ser una partícula, o al menos no en el sentido de «corpúsculo». Por cierto, ¿qué tamaño tienen los fotones?; ¿y los electrones?

¿Y si también los electrones y el resto de las partículas fueran cuantos de un campo? Este exótico y aparentemente descabellado cambio de visión nos permite matar varios pájaros de un tiro: dotar de sentido al carácter ubicuo del electrón en el experimento de la doble rendija, explicar la existencia de antipartículas, solucionar el problema de las probabilidades negativas, entender la creación y aniquilación de partículas y antipartículas e interpretar la desaparición de las que son inestables. Veamos cómo.

Recordemos que un campo representa el valor de una magnitud física en el espacio y en el tiempo. Esta magnitud puede

ser escalar, como un campo de temperaturas, o vectorial, con módulo, dirección y sentido, como un campo de vientos. El campo electromagnético es otro ejemplo de campo vectorial, que en este caso informa de qué le pasa a una carga eléctrica situada en cada punto del espacio: si la vemos en reposo sufrirá una fuerza en la misma dirección y sentido del campo eléctrico si su carga es positiva y en sentido opuesto si su carga es negativa, y si la vemos en movimiento sufrirá además una fuerza perpendicular a su velocidad y a la dirección del campo magnético. El campo electromagnético es un *campo de fuerza*.

Hemos visto que una onda electromagnética es la propagación de las oscilaciones del campo electromagnético, que se transmiten de un punto a otro del espacio transportando energía. Al *cuantizar el campo*, la energía de estas ondas solamente puede tomar ciertos valores discontinuos, pues es la suma de paquetes de energía o cuantos que llamamos fotones. Esta fue la audaz propuesta de Planck. Los fotones tienen espín 1, debido a que el campo electromagnético es un campo vectorial. Las ondas electromagnéticas, soluciones de las ecuaciones de Maxwell, se propagan a la velocidad de la luz porque los fotones no tienen masa. Una onda electromagnética no es la onda asociada a un fotón, sino que de alguna manera está hecha de fotones. La mínima energía que puede tener una onda de frecuencia v es $E = h\nu$, la energía de un fotón de esa frecuencia.

De la misma forma, suponemos que las soluciones de la ecuación de Dirac, otra ecuación de ondas, son los valores de un *campo de materia*, no la función de onda de una sola partícula. Esta vez el campo no es vectorial, sino espinorial (espín 1/2), algo que como ya se ha dicho no tiene análogo clásico. Sus oscilaciones producen también ondas que se propagan por el espacio transportando energía. Al cuantizar el campo, esa energía se agrupa igualmente en paquetes: el campo no se puede *excitar*, es decir, poner a oscilar, si no se dispone de una energía mínima $E = mc^2$, donde m es la masa del cuanto de este campo. Pero hay dos tipos de cuantos en un campo de Dirac: los de energía positiva, las partículas, y los de energía negativa, las antipartículas, que tienen carga opuesta y equivalen a partículas que viajen *hacia atrás en*

el tiempo! y en sentido contrario. Esta es la fantástica interpretación de lo que es una antipartícula, debida a Richard Feynman. Puede ocurrir que partícula y antipartícula coincidan, como en el caso del fotón, para lo que es necesario, aunque no suficiente, que el campo sea eléctricamente neutro.

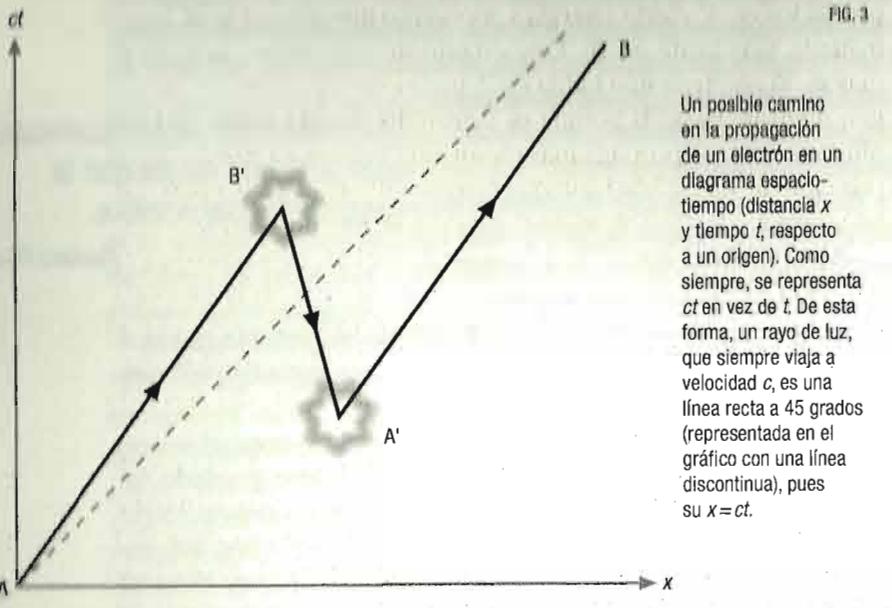
Podría pensarse que la existencia de un cuanto viajando hacia el pasado violará el *principio de causalidad*, pues ningún efecto debe preceder a su causa. Pero es precisamente el hecho de que existan cuantos de ambos tipos, partícula y antipartícula, lo que garantiza su cumplimiento. Veamos por qué.

De acuerdo con la teoría de la relatividad es imposible que «algo» viaje más rápido que la luz. Si, para un observador dado, un suceso A ocurre antes que un suceso B, separados por un cierto intervalo de tiempo t y una cierta distancia x , está claro que entonces A no puede influir en B si x es mayor que ct , pues ninguna señal puede comunicarlos, ni siquiera la luz. Decimos entonces que ambos sucesos no están conectados causalmente. Una señal más rápida que la luz entre A y B podría informar a alguien en B de cómo evitar el suceso A, pero si A es la causa de B eso no debe consentirse pues puede verse que, precisamente en tales casos, hay observadores para los que B ocurre antes que A y esos estarían a tiempo de impedir A, con lo que B nunca habría podido suceder.

Sin embargo, en la teoría cuántica existe una probabilidad pequeña pero no nula de que una partícula que se ha detectado en A «vuelva a ser detectada» en B, no conectado causalmente con A. Si esa partícula viajara «realmente» más rápido que la luz entre A y B tendríamos un serio problema. Pero, no es esto lo que ocurre. Para entenderlo, recordemos que entre A y B hemos de dibujar todos los caminos posibles, incluidos aquellos en los que el cuanto viaja hacia atrás en el tiempo, pues mientras no observamos la partícula no sabemos ni cuándo ni por dónde pasa. En la figura 3 representamos en un diagrama espacio-tiempo un camino posible, que involucra necesariamente la existencia de la antipartícula.

La imaginación de la naturaleza es muchísimo mayor que la imaginación del hombre.

RICHARD FEYNMAN



Un electrón, representado por una flecha, parte de A de izquierda a derecha a una cierta velocidad uniforme. Vemos que nunca podrá alcanzar B sin violar las reglas de la relatividad, es decir, sin superar c , la velocidad de la luz. La línea a 45° representa en este gráfico un rayo de luz partiendo de A. Claramente, A y B no están conectados causalmente, pues B se encuentra fuera del *cono de luz* de A, la región accesible viajando a velocidades inferiores a c . Sin embargo, entre B' y A' el electrón va hacia atrás en el tiempo, y entre A' y B de nuevo hacia delante, con la misma velocidad que al principio, hasta B, donde es detectado. ¿Significa esto que el electrón que partía de A ha sido detectado en B? ¡No! El electrón original viajaba legalmente entre A y B', con la misma velocidad que otro electrón idéntico lo hace entre A' y B, pero no es el mismo. En A' se ha producido una *fluctuación cuántica*, se ha creado un par electrón-positrón, tras lo cual el positrón del par se ha *aniquilado* en B' con el electrón original mientras que el nuevo electrón ha viajado hasta B donde es detectado. En este caso, el

positrón es un cuanto *virtual*, sin existencia real, que ha tomado prestados en A' cierta energía y momento que devuelve un breve instante más tarde en B'. Este cuanto no está sobre su capa de masas. El electrón que había en A no puede por tanto llevar ningún mensaje hasta B porque es destruido por el camino, así que ninguna señal se propaga más rápido que la luz, de acuerdo con el principio de causalidad, aunque ciertamente es posible encontrar un electrón idéntico al original más allá de su cono de luz.

Si invertimos el sentido de todas las flechas, el mismo diagrama de la figura 3 describiría un posible camino en la propagación de un positrón, que en algún momento se aniquila con el electrón de un par electrón-positrón, siendo el positrón del par el que es detectado más tarde fuera del cono de luz del positrón original y el electrón una partícula virtual.

Son por tanto partícula y antipartícula dos tipos de cuanto de un campo necesarios para que la teoría cuántica relativista tenga sentido. Pero si cuesta la misma energía crear partículas y antipartículas, ¿cómo es que hay más de un tipo que del otro? Como hemos visto, cuando materia y antimateria se encuentran se aniquilan, así que de hecho es una suerte que haya más de un tipo, materia, que del otro, pues de lo contrario no estaríamos aquí para contarlo. Esto es algo que tendremos que explicar cuando hablemos de las interacciones.

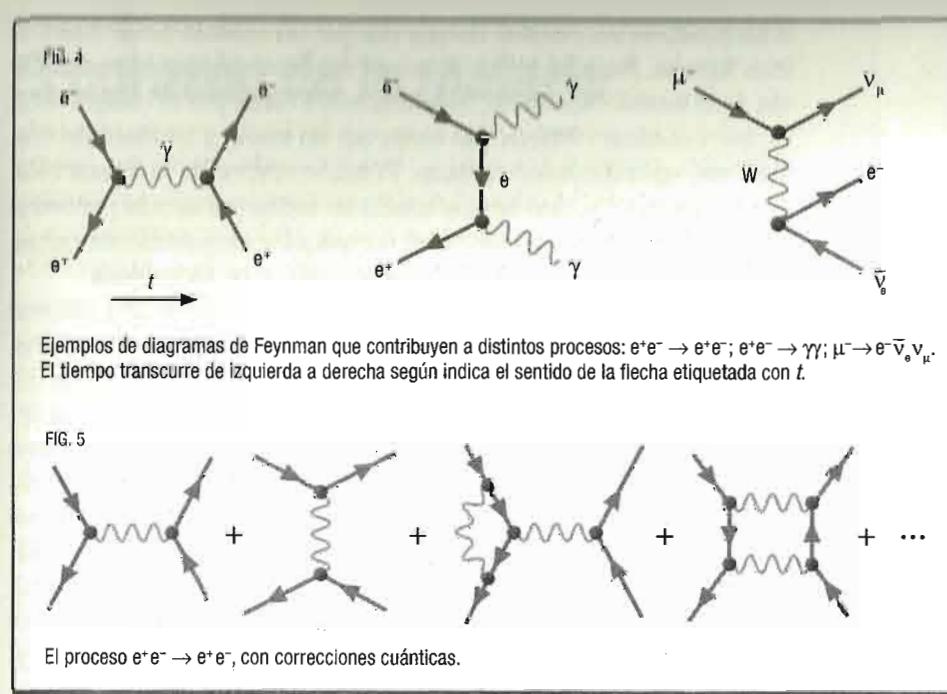
La formulación de la teoría cuántica de campos como suma sobre posibles caminos entre un estado inicial y otro final conduce a la interpretación gráfica de los procesos cuánticos mediante *diagramas de Feynman*, en los que partículas y antipartículas, representadas por líneas, se propagan libremente excepto en puntos llamados *vértices* donde tienen lugar las interacciones. Para hallar la amplitud de probabilidad de un proceso hay que sumar las contribuciones de todos los diagramas posibles.

En la figura 4 se muestran ejemplos de diagramas de Feynman para varios procesos diferentes. Se usan líneas onduladas para los fotones (γ), que son su propia antipartícula, y para los cuantos de los campos de cualquier otra interacción, todos tienen espín 1, como por ejemplo los de la interacción débil (W^- y su antipartícula W^+), que participan en la desintegración del muón. Se usan

líneas con una flecha para los cuantos de los campos fermiónicos de espín 1/2: las partículas tienen la flecha en la misma dirección que el flujo normal del tiempo, convencionalmente de izquierda a derecha, y las antipartículas tienen la flecha en sentido contrario al tiempo, así que entran en un vértice cuando parece que salen y viceversa. En dicha figura 4 aparecen cuantos de varios campos fermiónicos. Electrón (e^-) y positrón (e^+) son respectivamente la partícula y la antipartícula del «campo del electrón». Al campo se le da el nombre de la partícula. También son fermiones de otros campos, el muon (μ^-), el neutrino del electrón o neutrino electrónico (v_e) y el neutrino del muon o neutrino muónico (v_μ), y sus correspondientes antipartículas, que a veces se indican con una barra superior, como el antineutrino del electrón (\bar{v}_e). Por ejemplo, en el primer diagrama de la figura 4 se aniquilan un electrón y un positrón (un electrón viajando hacia atrás en el tiempo), creándose un fotón que se convierte de nuevo en un par electrón-positrón.

Las líneas internas entre dos vértices de interacción expresan la propagación de cuantos virtuales que, como pueden tener cualquier sentido en el tiempo, no son específicamente ni partícula ni antipartícula. En cada vértice se conservan siempre energía y momento, pero no necesariamente la masa o el tipo y número de cuantos. De hecho, lo que le pasa al electrón en los puntos A' y B' de la figura 3 mientras se propaga sin ser observado entre A y B, tiene una interpretación sencilla en términos de diagramas de Feynman. Un electrón puede tomar energía prestada del campo electromagnético, interactuando con un fotón en algún instante a lo largo de su propagación y devolviéndola en otro instante mediante una nueva interacción con el mismo fotón, que no se emite o absorbe realmente sino que es tan virtual como el electrón o positrón intermedios.

De la misma forma, en un proceso de colisión entre dos partículas, que más apropiadamente suele llamarse dispersión o *scattering*, pueden darse diversas posibilidades. Por ejemplo, en la colisión e^+e^- cabe esperar hallar de nuevo e^+e^- en el estado final. Al proceso $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ contribuyen los diagramas de la figura 5, que contienen dos líneas fermiónicas entre las que se intercambian fotones, *mediadores* de la interacción electromag-



nética y un conjunto infinito de correcciones, que involucran el intercambio de más fotones, electrones y positrones virtuales. En este proceso, el estado inicial y el final contienen las mismas partículas. Pero también puede darse la aniquilación total del par electrón-positrón en dos fotones, $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$, como indica el segundo diagrama de la figura 4, al que hay que sumar asimismo otros diagramas parecidos a los de la figura 5.

Finalmente, una partícula puede *decaer* a otras, siempre que la suma de las masas de las partículas del estado final sea menor que la masa inicial, pues la masa es la mínima energía que puede tener una partícula y la energía se conserva en el proceso. No significa eso que esas partículas finales sean fragmentos que formen parte de la partícula inicial, sino que la energía inicial se ha transferido mediante interacciones de unos campos a otros. Eso es lo que ocurre en la desintegración del muon, representado en primera aproximación por el tercer diagrama de la figura 4. Un electrón

El corazón de la materia

o un positrón no pueden decaer porque no existen otros cuantos más ligeros. Pero un muon sí puede hacerlo, gracias a la existencia de la interacción débil, mediada entre otros por el campo de la W, que contiene vértices que conectan un muon y un electrón con sus correspondientes neutrinos. El único vértice de la interacción electromagnética, que hemos usado en todos los demás procesos mostrados, conecta un electrón, o cualquier otra partícula cargada eléctricamente, con un fotón, sin cambiar su naturaleza.

Así que las partículas elementales, y sus antipartículas, no son trozos de materia sino paquetes de energía, que por tanto no ocupan volumen. Son modos de vibración de campos cuánticos, ya sean de materia o de interacción, que se propagan por el espacio, si se les logra excitar transfiriéndoles suficiente energía, al menos $E = m c^2$ donde m es la masa de la partícula. La masa de las partículas elementales no es la cantidad de materia que tienen, porque su tamaño es cero. Habrá que explicar de dónde proviene esa masa, una energía cristalizada que actúa como lastre en su propagación. Algunas, como el fotón, no tienen masa, así que viajan a la velocidad de la luz. La energía de los campos se puede transmitir de unos a otros mediante interacciones, lo que se manifiesta en procesos en los que una o más partículas iniciales se convierten en un conjunto de partículas finales. En el primer caso decimos que la partícula decae y en el segundo hablamos de proceso de dispersión. Tales procesos de campos pueden interpretarse mediante diagramas de Feynman en los que partículas iniciales y finales intercambian otras, que llamamos virtuales.

Los campos cuánticos son los verdaderos ladrillos de la materia y al mismo tiempo dan cuenta de las interacciones. Los campos son entes extensos, que ocupan todo el espacio, lo que justifica las extrañas propiedades de las partículas subatómicas, relacionadas con la acción a distancia, la deslocalización y la interferencia, que en un principio se achacaron a «ondas asociadas» a las partículas. Esto permite entender experimentos como el de la doble rendija. Nada impide que un cuanto «pase» simultáneamente por dos rendijas, porque el cuanto no es otra cosa que la propagación de la oscilación de un campo, y este es sensible simultáneamente a la presencia de las dos rendijas.

Las partículas son paquetes de energía de los campos cuánticos, pero ¿de qué campos cuánticos está hecho el universo? Bastan unas pocas partículas para componer el átomo, y una más para entender los procesos termonucleares que acontecen en las estrellas. Las demás jugaron un papel relevante solo en los primeros instantes tras el Big Bang y, finalmente, otras son las mediadoras de las interacciones.

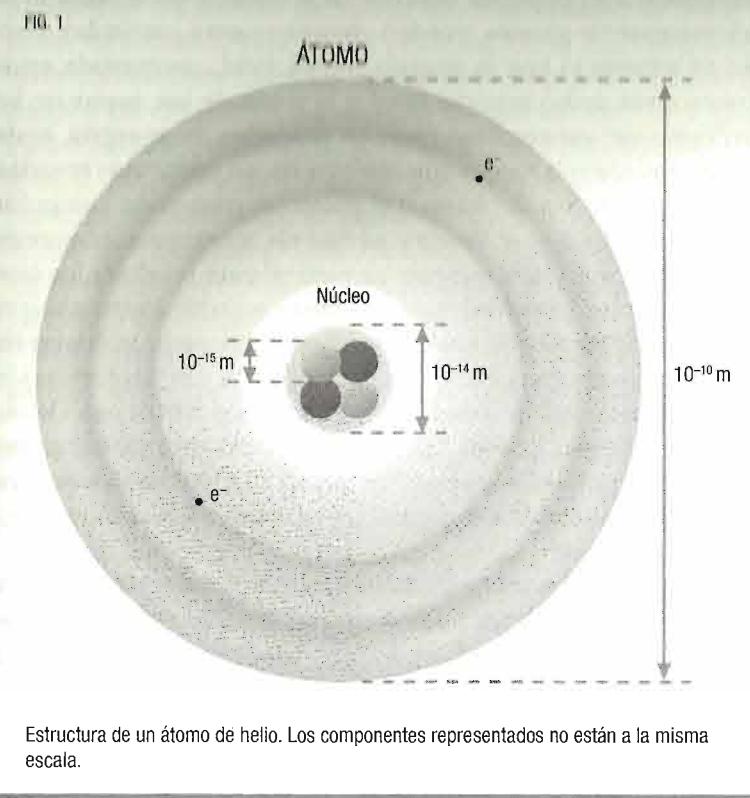
Cabría pensar que para discernir distancias cada vez más pequeñas necesitamos un microscopio con mayor número de aumentos. Sin embargo, cualquier instrumento óptico acaba adoleciendo de la misma limitación: es imposible resolver ningún objeto que tenga un tamaño inferior al de la longitud de onda de la luz con que se le ilumina. La longitud de onda es la única escala de la luz, que viene a ser como la distancia entre las dos marcas más próximas de una regla graduada, o como el tamaño de un píxel de una imagen digital. No se consigue nada ampliando la imagen con una lente muy potente, pues esta imagen sigue siendo borrosa si el detalle que queremos ver es inferior a un píxel y tampoco podremos medir el objeto si este es más pequeño que la escala de nuestra regla.

Un microscopio óptico puede resolver distancias de unos cientos de nanómetros (nm), en el rango de las longitudes de onda de la luz visible. Esto es unas décimas de micra (μm), el tamaño típico de una bacteria, suficiente para distinguir células, como los glóbulos rojos, que miden unas $7\ \mu\text{m}$, pero no los virus, que son unas cien veces menores que una bacteria. Podemos plantearnos disminuir la longitud de onda de la luz incidente

para poder así distinguir detalles más finos. Pero resulta más eficiente usar electrones en vez de fotones para sondear la muestra, explotando el hecho de que toda partícula se comporta como una onda de $\lambda = h/p$, donde p es el momento de la partícula. Esto también vale para la luz, pues el momento de un fotón es $p = E/c = h\nu/c$, de modo que, en efecto, su longitud de onda es $\lambda = c/\nu$. Un fotón de 500 nm tiene un momento $p = 2,5 \text{ eV}/c$. En un microscopio electrónico, en el que se pueden acelerar electrones hasta $p = 100 \text{ keV}/c$, se logran, por tanto, resoluciones 40 000 veces mejores, del orden de fracciones de ángstrom. Un keV (kiloelectronvoltio) es la energía que adquiere un electrón sometido a una diferencia de potencial de mil voltios.

Recordemos que un ángstrom (\AA), 10^{-10} m , viene a ser el tamaño de un átomo de hidrógeno, el átomo más pequeño, así que con un microscopio electrónico podemos en principio «ver» átomos. Pero al hacerlo nos topamos con la incertidumbre cuántica: la posición de un electrón alrededor del núcleo, que marca el tamaño de un átomo de hidrógeno, no puede medirse con total precisión sino que solo puede conocerse la probabilidad de encontrarlo a una determinada distancia del núcleo. La distancia más probable es el radio de la órbita de Bohr, aproximadamente $0,5 \text{ \AA}$, pero cada vez que miramos dónde está el electrón atómico lo veremos a una distancia distinta. Si mediante alguna técnica se promedian muchas medidas a lo largo de un intervalo de tiempo, se consigue visualizar un *orbital*, la zona del espacio alrededor del núcleo donde es más probable hallar el electrón de la corteza atómica. Se comprueba así que no se trata de una órbita localizada, como la de un planeta alrededor del Sol, sino que el electrón está deslocalizado, disperso en una región tan ancha como el propio radio de Bohr, lo que confirma una imagen inevitablemente borrosa del mundo subatómico.

Por consiguiente, aunque aumentemos la energía de nuestra sonda, mejorando así la resolución, no lograremos una «imagen» nítida del átomo. Y han hecho falta sondas muy energéticas para inferir el tamaño del núcleo, que resulta ser del orden de $10 \text{ fm} = 10^{-14} \text{ \AA} = 10^{-14} \text{ m}$ (figura 1). Un femtómetro (fm), también llamado fermi, 10^{-15} m , es más o menos el tamaño de un neutrón,



Estructura de un átomo de helio. Los componentes representados no están a la misma escala.

y también aproximadamente el de un protón, el núcleo de un átomo de hidrógeno. Así que un átomo no es una densa acumulación de partículas, sino una nube de electrones pululando (la palabra «orbitando» no refleja bien la realidad) relativamente muy lejos, en promedio, del núcleo. El átomo está prácticamente hueco. Para hacernos una idea, si el núcleo tuviera el diámetro de una pelota de balonmano (unos 20 cm), sus electrones estarían situados en alguna parte a 1 km de distancia del centro y un protón tendría el diámetro de una canica (unos 2 cm).

Por otro lado surge un problema que en realidad resulta una bendición. Al invadir el objeto de observación con partículas, ya sean fotones, electrones o cualquier otra cosa, no solamente

perturbamos su posición sino que, si la energía de la colisión es suficientemente grande, pueden crearse nuevas partículas. Para ello es necesario que la energía inicial total, conservada en el proceso, sea como mínimo igual a la suma de las masas de las partículas del estado final (mc^2 en unidades de energía), invirtiéndose el exceso en energía cinética de las partículas creadas. Excepto en el caso del fotón y el gluon (el cuanto del campo de la interacción nuclear fuerte), ambos de masa nula, la energía inicial debe, por tanto, superar un umbral para producir las nuevas partículas. Por supuesto, si chocan dos partículas es siempre energéticamente viable que entre los posibles estados finales estén esas mismas dos partículas. Pero además, la transformación de unas partículas en otras está sujeta a unas reglas que vienen dadas por cuáles sean los campos que pueden interaccionar entre sí, intercambiando su energía. Estudiando estos procesos de colisión hemos elaborado un modelo que describe las interacciones fundamentales.

Así que los instrumentos de la física de partículas no se parecen tanto a avanzados microscopios para ver objetos muy pequeños sino a poderosos «martillos» con los que machacamos la materia. Y no es que simplemente pretendamos romperla en trocitos para saber de qué está hecha, como haría un niño al destrozar un juguete para averiguar qué tiene dentro. Gracias a $E=mc^2$, entre los «restos del choque» de dos protones acelerados hasta energías cinéticas miles de veces superiores a sus masas en reposo, como ocurre en el LHC, es posible encontrar otras partículas de masas mucho mayores que la del propio protón. Es como si tras chocar dos coches se obtuvieran fragmentos que pesan decenas e incluso centenares de veces más que cualquiera de los vehículos accidentados. Obviamente en tal caso las partículas finales no estaban dentro del protón, sino que se han creado al cristalizar en masa parte de la energía de la colisión.

De esta forma hemos logrado descubrir partículas nuevas, que no son parte del átomo, y también deducir que protones y neutrones, los dos constituyentes de los núcleos atómicos, poseen a su vez una estructura interna basada en dos tipos de quarks.

Algunas de las nuevas partículas son elementales, es decir, carecen de subestructura, según creemos. Otras son compuestas, diversas combinaciones de varios tipos de quarks, algunos distintos a los del núcleo. La mayoría decaen en otras más ligeras inmediatamente después de ser producidas y por eso no son parte de la materia estable. Aun así, a todas ellas se las suele llamar partículas subatómicas. Se han necesitado varias décadas de esfuerzo experimental y desarrollo teórico para llegar a clasificar los cientos de partículas descubiertas en términos de unas pocas partículas elementales.

Para futura referencia, conviene resumir las escalas de energía que se usan habitualmente en física de partículas:

$$\begin{aligned}1 \text{ keV} &= 10^3 \text{ eV} \\1 \text{ MeV} &= 10^6 \text{ eV} \\1 \text{ GeV} &= 10^9 \text{ eV} \\1 \text{ TeV} &= 10^{12} \text{ eV}\end{aligned}$$

¿CÓMO PRODUCIMOS LAS PARTÍCULAS?

Conseguir electrones y protones es fácil, pues son estables y se encuentran en la materia ordinaria. Los electrones se pueden arrancar de los átomos al calentarlos. Los protones son lo que queda al despojar de su único electrón a los átomos de hidrógeno, un gas abundante y barato (aunque se necesita muy poca cantidad), para lo que basta un campo eléctrico que lo descomponga, atrayendo los protones hacia el electrodo negativo y los electrones hacia el positivo. Las demás partículas se obtienen de tres fuentes principalmente: rayos cósmicos, reactores nucleares y aceleradores de partículas.

Los rayos cósmicos son partículas de muy alta energía, mayoritariamente protones, provenientes del espacio exterior, que al ir chocando con los átomos de la atmósfera producen a su vez una cascada de infinidad de partículas secundarias según van avanzando. Fueron descubiertos por Victor Hess en 1911, mientras investigaba a bordo de un globo aerostático la proceden-

cia de una radiación de alto poder penetrante incidente desde arriba, que no podía ser causada por emanaciones radiactivas terrestres. Al suelo llegan esencialmente electrones, muones, neutrinos, sus antipartículas y en mucha menor cantidad otras partículas. El resto decaen o son absorbidas por la atmósfera. De hecho, fue en los rayos cósmicos donde Carl David Anderson descubrió en 1932 el positrón y cinco años más tarde el muon. Y también piones, kaones y partículas lambda, miembros de un numeroso grupo de partículas que llamamos hadrones, que incluye asimismo al protón y al neutrón. Los rayos cósmicos son nuestra fuente más energética de partículas, hasta diez millones de veces más que nuestro más potente acelerador, pero también la más incontrolable, pues no podemos regular su dirección ni su flujo, que disminuye exponencialmente con la energía.

Los reactores nucleares son fuentes de neutrones, neutrinos, partículas alfa (estados ligados de dos neutrones y dos protones), partículas beta (electrones y positrones) y rayos gamma (fotones de cierta energía, en realidad). Estas partículas son el resultado de la desintegración de determinados núcleos atómicos.

Los aceleradores de partículas son sin duda nuestra herramienta más versátil. Usamos partículas cargadas (electrones y protones), porque así podemos acelerarlas mediante campos eléctricos. En algunos casos las hacemos chocar contra un blanco fijo (un bloque de algún material denso) para producir un nuevo haz de partículas (positrones, antiprotones, muones, neutrinos, etc.) que aislamos y dirigimos contra otro blanco o bien contra otro haz de partículas. Las partículas cargadas estables pueden incluso acumularse en anillos de almacenamiento, girando en tubos de vacío guiadas por campos magnéticos.

La forma más eficaz de conseguir mucha energía en la colisión, para producir nuevas partículas, no es lanzar un haz contra un blanco fijo sino contra otro haz en sentido contrario. Para ello hay que tener muy buena puntería ya que los haces son muy finos, pues interesa concentrar mucho los proyectiles y de esa forma aumentar la probabilidad de que haya choques. La focalización de los haces se consigue mediante campos magnéticos adicionales que funcionan como lentes, la llamada óptica

de aceleradores. En principio, lo mejor es usar dos anillos de almacenamiento con partículas girando en sentidos contrarios, que se intersectan en uno o varios puntos de interacción, donde colocamos los detectores. Así podemos incrementar la energía de los proyectiles dándoles un impulso adicional a cada vuelta de forma sincronizada (*sincrotrón*), como cuando empujamos a un niño en un columpio.

Pero cuando una partícula cargada es acelerada emite radiación, como ocurre por ejemplo al hacerla girar a gran velocidad (*radiación sincrotrón*). La energía perdida en forma de radiación crece con la energía de la partícula E^4 (a la cuarta potencia) y es inversamente proporcional a su masa m^4 (a la cuarta) y al radio de giro R^2 (al cuadrado). Así que para conseguir altas energías se requieren anillos muy grandes o de lo contrario lo que se invierte en acelerar se pierde por radiación. Para un tamaño fijo de acelerador circular, es más conveniente usar protones o antiprotones (colisionador hadrónico) que electrones o positrones (colisionador leptónico), pues los primeros tienen una masa mucho mayor con lo que se pueden lograr energías más altas sin grandes pérdidas. Por otro lado, a diferencia de los electrones, los protones son partículas compuestas, de modo que al hacerlos chocar la colisión no es tan limpia, pues pueden interaccionar cualquiera de sus componentes, que portan solo una fracción de la energía total del proyectil, lo que complica las cosas. Se suele decir por eso que los colisionadores leptónicos son de precisión y los hadrónicos de descubrimiento.

El mayor acelerador del mundo se encuentra actualmente en el CERN, la Organización Europea para la Investigación Nuclear, a las afueras de Ginebra (Suiza). Está bajo tierra, en un túnel circular de 27 km construido para albergar el LEP (Gran Colisionador Electrón-Positrón), que llegó a alcanzar una energía de 200 GeV (200 000 millones de electronvoltios). Desmantelado este, en el mismo lugar se instaló y opera desde 2010 el LHC (Gran Colisionador de Hadrones) que comenzó trabajando a 7 TeV (billones de electronvoltios), luego a 8 y ahora funciona a 13, cerca de su máxima energía nominal. En el LEP se estudiaron con mucho detalle las propiedades de los bosones W y Z, mediadores de la

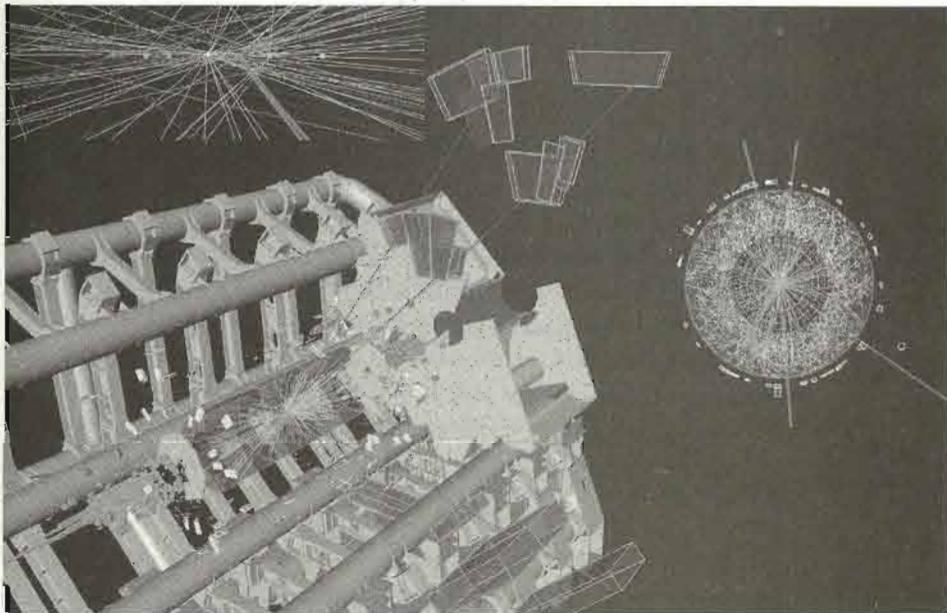
interacción débil, y en el LHC se ha descubierto el bosón de Higgs, el último eslabón del modelo estándar de la física de partículas. El papel que desempeñan en el LHC sus cuatro detectores principales (ATLAS, ALICE, CMS y LHCb) es fundamental. También son muy importantes otros colisionadores más pequeños que exploran energías más bajas usando haces muy intensos, llamados factorías de partículas, con las que se miden las interacciones con alta precisión.

La alternativa para muy altas energías son los aceleradores lineales, que no emiten radiación sincrotrón pero requieren tramos muy largos y gran eficiencia de aceleración, pues los haces solo pasan una vez. El próximo gran acelerador podría ser el ILC (colisionador lineal internacional), un proyecto que compite con el FCC (futuro colisionador circular), ambos leptónicos.

¿CÓMO VEMOS LAS PARTÍCULAS?

Los detectores de partículas son los «ojos» que hacen posible visualizar el resultado de la colisión, que llamamos *suceso*.

Hay muchos tipos de detectores: contadores Geiger, emulsiones fotográficas, cámaras de niebla, cámaras de burbujas, cámaras de chispas, cámaras de hilos, calorímetros, detectores de luz Cherenkov, fotomultiplicadores y bastantes más. En realidad, un detector moderno está compuesto de varios de ellos, dispuestos en capas. Los detalles no importan, pero casi todos se basan en que cuando una partícula cargada atraviesa un medio ioniza sus átomos, arrancándoles electrones, con lo que se convierten en centros de formación de gotitas, burbujas o chispas, o sometidos a una diferencia de potencial generan corrientes entre hilos cargados, lo que permite trazar su trayectoria. Las partículas neutras no dejan traza, son invisibles, aunque pueden depositar energía en los calorímetros donde son absorbidas. Con la electrónica adecuada, los ordenadores recogen esa información, reconstruyen las trazas y las monitorizan en una pantalla donde queda reflejado el suceso (véase la imagen inferior de la página contigua), aunque se guardan muchos más detalles en extensos archivos de datos.



Arriba, vista de parte del detector ATLAS y la caverna en la que está alojado. El ATLAS es uno de los cuatro gigantescos detectores principales con que cuenta el LHC. La imagen inferior muestra un suceso en el ATLAS del LHC, interpretado como la creación y desintegración de un bosón de Higgs, $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\mu$.

Los detectores están complementados con intensos campos magnéticos para curvar las trayectorias de las partículas cargadas; el radio de curvatura es proporcional al momento de la partícula e inversamente proporcional a su carga y al campo magnético aplicado, y el sentido de giro determina el signo de la carga. Esto ayuda a identificar las partículas.

SE NECESITAN NEUTRINOS

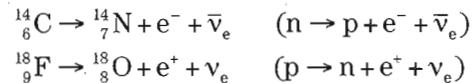
Alrededor de 1910, Ernest Rutherford desentrañó en lo esencial la estructura del átomo: una corteza de electrones cargados negativamente y un núcleo central de carga eléctrica positiva. El electrón había sido descubierto en los rayos catódicos por J.J. Thomson en las postrimerías del siglo XIX, marcando el comienzo del fin del átomo como entidad indivisible. A finales de la década de 1920, el mismo Rutherford descubrió el protón, de carga igual a la del electrón pero signo opuesto, como componente del núcleo, y propuso otro, el neutrón, confirmado experimentalmente por James Chadwick una década más tarde. Protón y neutrón tienen masa similar, unas dos mil veces mayor que la del electrón. El átomo de helio, con dos electrones en la corteza, no es dos sino cuatro veces más pesado que el de hidrógeno, y el de litio, con tres electrones, no es tres sino siete veces más pesado, porque además de los correspondientes protones tienen dos y cuatro neutrones en el núcleo, respectivamente.

Esta estructura interna justifica la clasificación de los elementos químicos en la *tabla periódica* de Dmitri I. Mendeléyev, quien en 1870 había agrupado según sus pesos atómicos todos los elementos conocidos en aquella época, más de cincuenta, siendo capaz de predecir la existencia de otros nuevos por los huecos que quedaban libres. Las propiedades de los diversos elementos se pueden deducir de las distintas configuraciones posibles de electrones en la corteza del átomo, ligados al núcleo por la *interacción electromagnética* entre protones y electrones, la única relevante para la química. También explica la existencia de isótopos de un mismo elemento, formados por átomos

cuyos núcleos difieren solo en el número de neutrones, ocupando por tanto el mismo lugar en la *tabla periódica*, que viene determinado por el número de electrones, igual al de protones (*número atómico*). Así que combinando solamente tres partículas logramos describir decenas de átomos. Una gran simplificación.

Neutrinos y protones reciben conjuntamente el nombre de nucleones. Conviven en el interior del núcleo, unidos por la *fuerza nuclear*, que es en realidad una fuerza residual, remanente de la interacción fuerte entre los quarks que ambos tienen dentro. Esta fuerza nuclear es atractiva para contrarrestar la fuerza de repulsión electromagnética entre los protones, pero ambas fuerzas están bastante ajustadas por lo que los dos tipos de nucleones son necesarios para lograr la estabilidad nuclear.

Para ser estable, un núcleo ligero debe tener un número parecido de protones y neutrones y cada vez más neutrones que protones si es pesado. Cuando un núcleo tiene exceso de unos u otros, se dice que es *radiactivo* y se desintegra en un tiempo característico, su vida media, a veces en varios pasos, hasta llegar a un núcleo estable. Algunos núcleos radiactivos se desintegran en un proceso en el que un neutrón se convierte en un protón emitiéndose un electrón (*radiación β^-*) o bien un protón se convierte en un neutrón emitiéndose un positrón (*radiación β^+*). Esto da lugar a una *transmutación nuclear* en la que el núcleo inicial se convierte en otro núcleo de número atómico una unidad mayor o menor, respectivamente. Por ejemplo:



El neutrón es ligeramente más pesado que el protón (véase la tabla de la página siguiente), así que solamente la primera de las dos reacciones entre paréntesis puede darse fuera del núcleo.

La función de la ciencia es descubrir la existencia de un reino del orden en la naturaleza y buscar las causas que gobiernan este orden.

DMITRI MENDELÉYEV

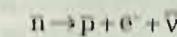
$J=1/2$	q	Masa	Primeras partículas subatómicas (todas de espín 1/2). Cargas eléctricas en unidades de la carga del protón y masas en MeV/ c^2 . Como referencia, $1 \text{ MeV}/c^2 = 1,8 \cdot 10^{-27} \text{ g}$.
ν_e	0	< 0,000002	
e^-	-1	0,511	
p	+1	938	
n	0	939	

La conservación de la energía implica que en una desintegración las masas finales no pueden superar a la masa inicial. Sin embargo, dentro del núcleo ambas reacciones son posibles ya que el núcleo inicial tiene mayor masa que el final, debido a la diferente energía de ligadura. Así que fuera del núcleo, el protón es estable al no poder decaer, mientras que el neutrón es inestable, viviendo en promedio un cuarto de hora.

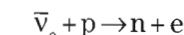
Estos procesos radiactivos se deben a la interacción débil y en todos ellos la emisión de un electrón o un positrón va siempre acompañada por un antineutrino o un neutrino, respectivamente. El neutrino es una partícula teorizada por Wolfgang Pauli en 1930, que no fue descubierta experimentalmente hasta treinta años más tarde. Un buen ejemplo del poder predictivo de los principios de la física.

Resulta que cuando una partícula decae a solo otras dos, la energía de ambas partículas finales queda completamente fijada por los valores de las masas de la partícula madre y las dos partículas hijas. Como se había observado que la radiación beta resultante no tenía una energía fija, sino un espectro continuo, Pauli propuso que debía emitirse además una tercera partícula para restaurar la conservación de la energía en la reacción. La conservación de la carga exigía que la hipotética nueva partícula fuera neutra. Fue bautizada por Enrico Fermi como «neutrino» para distinguirla del neutrón, poco después de que Chadwick descubriera este último. Por otro lado, la conservación del momento angular en esta reacción no sería posible si no existiera un neutrino, que debe ser un fermión de espín 1/2, igual que el electrón, el protón y el neutrón.

La desintegración del neutrón fuera del núcleo atómico,



fue confirmada experimentalmente en 1950, pero el neutrino no pudo ser detectado directamente hasta 1959, cuando Clyde L. Cowan y Frederick Reines lograron observar el proceso inverso,



usando antineutrinos provenientes de desintegraciones beta en un reactor nuclear.

El escaso margen entre la masa del neutrón y la suma de las masas de protón y electrón indica que el neutrino debe ser muy ligero. De hecho, durante mucho tiempo se supuso que los neutrinos no tenían masa.

UN ZOO DE NUEVAS PARTÍCULAS

La fuerza nuclear es capaz de compensar la repulsión eléctrica entre los protones pero debe operar solamente a cortas distancias, del orden del tamaño del núcleo, pues de lo contrario sería la fuerza dominante en el universo. En cambio, la interacción electromagnética, que disminuye igualmente con la separación, es de infinito alcance. Esto es porque su partícula mediadora, el fotón, tiene masa cero. Pero una interacción cuyo mediador tuviera masa no llegaría muy lejos. En efecto, una partícula virtual, de masa m , intercambiada entre dos nucleones tiene que tomar «prestada» una energía mínima mc^2 y, según el principio de incertidumbre, devolverla inmediatamente después (en un tiempo promedio Δt) tras recorrer una distancia máxima $c\Delta t = c\hbar/(2mc^2) = \hbar/(2mc)$. Como la distancia entre nucleones es del orden del femtómetro, en 1934 Hideki Yukawa propuso que la interacción nuclear debía estar mediada por una partícula

de unos 100 MeV/c². Se le llamó *mesón* por tener una masa «intermedia» entre la del electrón (*leptón*, «ligero») y la del protón o el neutrón (*bariones*, «pesados»).

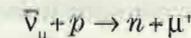
Cuando poco después se descubrió el muon (μ), con la masa prevista, se pensó que este sería el mesón de Yukawa, pero luego se supo que no había una sino dos nuevas partículas de masas parecidas en los rayos cósmicos; la otra es el pion (π), con propiedades distintas. El segundo puede decaer al primero y al hacerlo dejaba una solitaria traza en dirección distinta a la del pion inicial, lo que exigía la emisión de una partícula neutra adicional para garantizar la conservación de energía y momento. También se observó que el muon se desintegraba a un electrón, pero esta vez el electrón resultante no tenía una energía fija sino variable, como cuando decae el neutrón, lo que indicaba la emisión de dos partículas neutras. Estábamos asistiendo a otras dos desintegraciones débiles,

$$\begin{array}{ll} \pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu & \mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu \\ \pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu & \mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu \end{array}$$

Nótese que distinguimos entre neutrino (ν) y antineutrino ($\bar{\nu}$). La razón es que pronto se descubrió que en los procesos que involucran neutrinos parece conservarse siempre otra cantidad, llamada *número leptónico L*. Asignamos $L=1$ a electrón, muon y sus neutrinos, y número leptónico de signo opuesto $L=-1$ a sus antipartículas, como mandan los cánones. De esta forma explicamos por qué se da el proceso con el que se descubrió el neutrino electrónico, $\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$, pero nunca el proceso $\bar{\nu}_e + n \rightarrow p + e^-$. Como el muon tiene número leptónico, no se le considera un mesón, sino un leptón, como el electrón y los neutrinos.

También distinguimos entre dos tipos de neutrinos, ν_e y ν_μ . La causa de nuevo es una ley de conservación. Nunca se observa $\mu^- \rightarrow e^- + \gamma$, a pesar de que la carga eléctrica está preservada. Así que es natural asignar *número electrónico L_e* = 1 a e^- y ν_e , y *número muónico L_μ* = 1 a μ^- y ν_μ , que se conservan

por separado. Usando $\bar{\nu}_\mu$ procedentes de las desintegraciones de π^- , Leon Lederman, Melvin Schwartz y Jack Steinberger detectaron por primera vez en 1962 este segundo tipo de neutrinos mediante

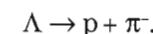


y comprobaron que nunca ocurría el proceso $\bar{\nu}_\mu + n \rightarrow p^+ + \mu^-$.

En el mismo año que el pion, que tiene otra versión neutra, se descubrió el kaon (K), bastante más pesado y también en dos versiones, que podían decaer a piones,



El kaon pertenece a la familia de los mesones, como el pion y otras muchas partículas (η , ρ , ω , etc.) que se fueron encontrando después. En 1950 se descubrió la partícula lambda (Λ), neutra y de mayor masa que el protón, que decae



La lambda pertenece a la familia de los bariones, junto con protón, neutrón y otras muchas (Σ , Ξ , Δ , etc.) que fueron apareciendo según se iban desarrollando los aceleradores de partículas. La razón de esta clasificación es otra cantidad conservada, el *número bariónico B*, que no poseen los mesones, ni los leptones. La conservación del número bariónico impide al protón desintegrarse, porque es el barión más ligero. El número de mesones, en cambio, no se conserva, como puede apreciarse en las desintegraciones de piones y kaones que hemos visto antes.

Algunos de los nuevos mesones y bariones (como K y Λ) eran «extraños» porque todos se producían en procesos muy rápidos (10^{-23} segundos) pero decaían de forma, relativamente, mucho más lenta (10^{-10} segundos) en comparación con ρ , ω y Δ , por ejemplo, que lo hacían tan rápido como se producían. Esto sugiere

ria que la producción se debía a la *interacción fuerte* (la misma que mantiene unidos a los nucleones) pero la desintegración de los extraños tenía que ver con la interacción débil, que es más lenta por ser una interacción más inefficiente. Así que se les atribuyó otra cantidad llamada *extrañeza S*, que se conserva en los procesos fuertes pero no en los débiles.

La proliferación de mesones y bariones (cientos de ellos a día de hoy) estaba apuntando a la existencia de una estructura interna que permitiera clasificarlos en términos de combinaciones de unos pocos constituyentes, como había pasado con los elementos químicos de la tabla periódica de Mendeléyev. En conjunto se les llama *hadrones* (del griego, «denso») porque son compuestos de otros elementos estrechamente ligados por la interacción fuerte.

Se conocen mesones más pesados que muchos bariones, así que la nomenclatura ya no expresa su significado original. Igual ocurre con la palabra leptón, con la que en la actualidad nos referimos a partículas que no sufren la interacción fuerte.

En 1975, Martin Perl descubrió un tercer leptón cargado, el *tau* (τ), con las mismas propiedades que el muon y el electrón, pero mucho más pesado, casi el doble que el protón. El τ se desintegra débilmente de forma análoga al muon emitiendo siempre un v_τ para conservar el *número tauónico*, pero puede hacerlo tanto a un electrón como a un muon junto con sus correspondientes neutrinos. Así que solamente hay seis tipos de leptones, que llamamos *sabores* leptónicos. Las desintegraciones débiles conservan el número leptónico total, pero «cambian el sabor».

LOS HADRONES ESTÁN HECHOS DE QUARKS

En un principio, se clasificó a los hadrones en un esquema llamado el *camino óctuple*, haciendo un guiño al «noble camino óctuple del budismo», una vía que en ocho pasos conduce a la perfección (*nirvana*). La idea fue de Murray Gell-Mann, quien en 1961 se dio cuenta de que podía encajar los ocho mesones y los ocho bariones más ligeros en un arreglo hexagonal, seis en los vértices

y dos en el centro. Su posición en el plano indicaba el valor de su carga eléctrica Q y su extrañeza S . El octete de bariones tiene dos miembros ilustres, el protón (p) y el neutrón (n), con cargas eléctricas que difieren en una unidad y la misma extrañeza, igual a cero.

Además de estos dos octetos de partículas, que compartían el mismo espín y masas parecidas, el esquema de clasificación predecía otro octete de mesones y un decuplete de bariones, este último en un arreglo triangular, ambos con espín una unidad mayor que los anteriores. A cada octete de mesones se debe añadir un noveno mesón (singlete) que también se había encontrado. El gran éxito fue que en este esquema había un hueco, que correspondía a un barión con triple extrañeza que fue descubierto poco después con exactamente las propiedades previstas.

¿Y cómo es que los hadrones encajan en este esquema tan raro? La explicación se debe al mismo Gell-Mann, quien en 1964, junto con George Zweig, propuso que los hadrones están compuestos de quarks, unas partículas elementales de espín 1/2 que se combinan siguiendo ciertas reglas:

— Los bariones están formados por tres quarks. Sus antipartículas están hechas de los antiquarks correspondientes. A cada quark se le asigna número bariónico $B=1/3$, y el opuesto a cada antiquark. Así que un barión tiene $B=1$ y su antipartícula $B=-1$.

— Los mesones están formados por un quark y un antiquark. Por tanto, su número bariónico es cero, como tiene que ser.

El momento angular total (espín J) de un barión solamente puede ser entonces 1/2, 3/2... y el de un mesón, 0, 1, 2... Por consiguiente, los bariones son fermiones y los mesones son bosones.

Obviamente la palabra quark no es de origen griego, sino otra ocurrencia de Gell-Mann, aunque según parece tomó prestada su ortografía de una novela de James Joyce. Por cierto, Zweig los había llamado «aces» (ases, en español).

Hay distintos tipos de quarks, también llamados *sabores*. En un principio se necesitaban tres sabores: *u* (*up*, «arriba»), *d* (*down*, «abajo») y *s* (*strange*, «extraño»), para construir los multipletos de hadrones (véase la tabla). El quark *u* tiene carga $Q = 2/3$ y los quarks *d* y *s* carga $Q = -1/3$. Los antiquarks, carga opuesta. La presencia del quark *s* es culpable de la «extrañeza» de algunos hadrones, salvo en los mesones que contengan $s\bar{s}$, en cuyo caso se anula.

Mesones			Bariones		
$J = 0$	Quarks	Masa	$J = 1/2$	Quarks	Masa
π^0	$u\bar{u}, d\bar{d}$	135	p	uud	938
π^+	$u\bar{d}$	140	n	udd	939
π^-	$d\bar{u}$	140	Λ^0	uds	1115
K^+	$u\bar{s}$	493	Σ^+	uus	1189
K^-	$s\bar{u}$	493	Σ^0	uds	1192
K^0	$d\bar{s}$	498	Σ^-	dds	1197
\bar{K}^0	$s\bar{d}$	498	Ξ^0	uss	1314
η	$u\bar{u}, d\bar{d}, s\bar{s}$	547	Ξ^-	dss	1321
η'	$u\bar{u}, d\bar{d}, s\bar{s}$	958			
$J = 1$	Quarks	Masa	$J = 3/2$	Quarks	Masa
ρ^0	$u\bar{u}, d\bar{d}$	775	Δ^{++}	uuu	1232
ρ^+	$u\bar{d}$	775	Δ^+	uud	1232
ρ^-	$d\bar{u}$	775	Δ^0	udd	1232
ω	$u\bar{u}, d\bar{d}$	782	Δ^-	ddd	1232
K^{*+}	$u\bar{s}$	892	Σ^{*+}	uus	1383
K^{*-}	$s\bar{u}$	892	Σ^{*0}	uds	1384
K^{*0}	$d\bar{s}$	896	Σ^{*-}	dds	1387
\bar{K}^{*0}	$s\bar{d}$	896	Ξ^{*0}	uss	1532
ϕ	$s\bar{s}$	1020	Ξ^{*-}	dss	1535
Hadrones a partir de tres tipos de quarks: <i>u</i> , <i>d</i> y <i>s</i> . Las cargas eléctricas de los quarks se suman. Masas en MeV/c^2 .			Ω^-	sss	1672

La interacción débil es capaz de cambiar el sabor de los quarks. Por ejemplo, un quark *d* por un *u* en la desintegración del neutrón (udd) a un protón (uud), $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$, o un *s* por un *u* en la desintegración de la partícula lambda (uds) a un protón y un pion ($d\bar{u}$), $\Lambda \rightarrow p + \pi^+$. En esta última, la extrañeza no se conserva como habíamos anticipado.

Sin embargo, la interacción fuerte, que liga a los quarks dentro de los hadrones, debe ser independiente del sabor. Esto permite explicar por qué los hadrones de un mismo multiplete tienen masas parecidas (véase la tabla). Las diferencias se deben fundamentalmente a que los quarks tienen masa, aunque la mayor parte de la masa hadrónica tiene su origen en la enorme energía de ligadura (otra vez la equivalencia de masa y energía) de la interacción fuerte, que no distingue el sabor. Las masas de *u* y *d* son muy pequeñas comparadas con la masa total de los hadrones ($m_u = 2 \text{ MeV}/c^2$, $m_d = 5 \text{ MeV}/c^2$, aproximadamente), así que su efecto es despreciable. Por eso la masa del protón y la del neutrón son casi iguales. Sin embargo, la masa del quark *s* es de unos $100 \text{ MeV}/c^2$, lo que justifica los saltos observados. También hay un efecto, casi irrelevante, debido a la interacción electromagnética, pues los quarks tienen carga eléctrica, lo que afecta ligeramente a la energía total de ligadura.

Todos los hadrones que se fueron encontrando encajaban bien en el modelo de quarks de tres sabores. Pero en 1974 dos experimentos independientes, uno liderado por Samuel Chao Chung Ting en el Laboratorio Nacional de Brookhaven (cerca de Nueva York) y el otro por Burton Richter en el SLAC (Stanford), ambos en Estados Unidos, descubrieron un mesón con unas propiedades especiales, al que cada uno puso su nombre y a falta de acuerdo hoy llamamos *jota-psi*, J/Ψ . Tan importante fue el hallazgo que se recuerda como la *Revolución de Noviembre*. La J/Ψ resulta estar compuesta por un nuevo quark, mucho más pesado que los anteriores, el *c* (*charm*, encanto) y su antipartícula. El *encanto* del mesón J/Ψ ($c\bar{c}$) es, por tanto, cero, pero muy pronto comenzaron a descubrirse otro montón de mesones y bariones con esa propiedad, análoga a la extrañeza, que se conserva en las interacciones fuertes pero no en las débiles.

Aparecieron los bariones Λ_c^+ (ude), Σ_c^+ (uuc), Ξ_c (usc) y Ω_c^0 (ssc) y los mesones D^0 (cū), D^+ (cd) y D_s^+ (cs), entre otros.

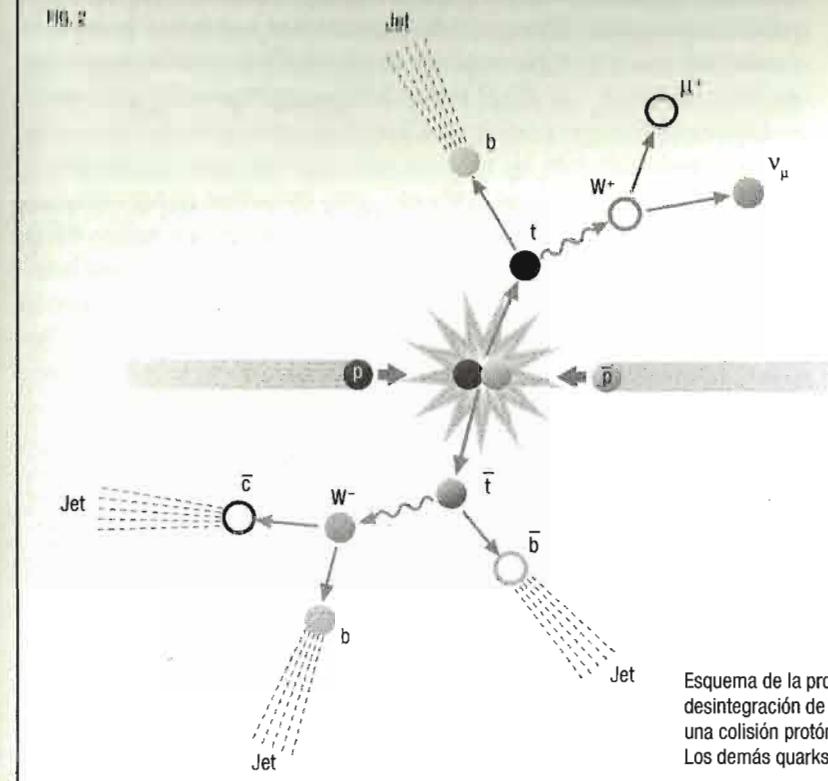
El modelo de quarks con cuatro sabores agrupa exitosamente a los hadrones en multipletes de un quark y un antiquark (mesones) y tres quarks (bariones). Sin embargo, los miembros de un mismo multiplete tienen masas cada vez menos parecidas, porque el quark c es incluso más pesado que un protón, unos 1200 MeV/c², lo que supone una contribución importante a la masa de los nuevos hadrones.

Por entonces, se conocían solamente cuatro leptones (e, μ , v_e y v_μ) así que se empezaba a pensar que bastaría con otros cuatro quarks (u, d, s y c) para describir todos los hadrones. Pero en 1975 se encontró el lepton τ , que debía ir acompañado de su propio v_τ . Volvían a ganar los leptones, aunque no por mucho tiempo. En 1977 se descubrió el mesón ípsilon, $\Upsilon(b\bar{b})$, y seguidamente, durante años, fueron apareciendo más bariones y mesones predichos por el modelo de quarks que contienen al menos un quark b (*bottom*, «fondo», o también *beauty*, «belleza») en su interior, aún más pesado que los otros: Λ_b^+ (udb), Σ_b^+ (uub), Ξ_b^- (dsb), B^0 (db), B^+ (ub), etc. La *belleza*, como el encanto y la extrañeza, se conserva en las interacciones fuertes, que no distinguen el sabor, pero se viola en las débiles.

Apelando al gusto por recuperar la simetría perdida, una aspiración que quedará plenamente justificada en el próximo capítulo, se esperaba encontrar un sexto quark, el t (*top*, «cima»), que se hizo de rogar, pero se descubrió finalmente en 1995 en un colisionador p \bar{p} , el Tevatron del Fermilab, cerca de Chicago. Tiene una masa enorme, unas ciento ochenta veces mayor que la de un nucleón (casi la masa de un átomo de oro) y unas cuarenta veces mayor que la del quark b.

El quark t es el único que no llega a ligarse con otros quarks mediante la interacción fuerte para formar un hadrón, pues antes se desintegra débilmente, en un proceso análogo a las desintegraciones de muon y neutrón (figura 2). Tengamos en cuenta que el tiempo que en promedio tarda una partícula en decaer aumenta con la intensidad de la interacción responsable (por eso son relativamente lentas las desintegraciones débiles) pero,

FIG. 2



Esquema de la producción y desintegración de un par t \bar{t} en una colisión protón-antiprotones. Los demás quarks dan jets.

por otro lado, disminuye mucho con la masa de la partícula que decae. Al ser el quark t tan pesado, su vida media es pequeñísima (unos 10⁻²⁵ segundos), tan corta que no le da tiempo a interaccionar fuertemente.

Por cierto, la vida media también depende de la diferencia entre la masa de la partícula que decae y la suma de las masas de las partículas finales. Cuando el único «canal» disponible es tal que deja «poco espacio» para la desintegración, esta se ve suprimida y la vida de la partícula es más larga. Esto es lo que ocurre en el caso del neutrón ($n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$), que vive unos quince minutos, mucho más que el muon ($\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + v_\mu$), dos millonésimas de segundo, a pesar de ser dos desintegraciones

débiles muy parecidas. La segunda está penalizada respecto a la primera porque la diferencia de masas entre neutrón y protón es mucho menor que entre muón y electrón. El factor de supresión es $[(m_n - m_p)/(m_\mu - m_e)]^6$; el resto de las masas pueden ignorarse.

Una cuestión que podemos plantearnos es cómo pueden existir mesones como π^0 , η , η' , etc., que son estados ligados de un quark y su antiquark ($u\bar{u}$, $d\bar{d}$, $s\bar{s}$). ¿No deberían aniquilarse en un par de fotones, como ocurre con el electrón y su antipartícula, el positrón? La respuesta es sí, de hecho lo hacen, pero la interacción electromagnética no es tan rápida como la interacción fuerte. Primero forman un mesón y luego se aniquilan en dos fotones, a no ser que encuentren otra forma más rápida de conseguirlo. Por ejemplo, el π^0 decae a $\gamma\gamma$ un 99% de las veces, el η un 30%, y el η' , un 2%. El primero vive alrededor de 10^{-17} segundos y los otros dos, unos 10^{-21} segundos. Además, también es posible formar un estado $e^- e^+$, ligado por la interacción electromagnética, el *positrónio*, una especie de átomo exótico de hidrógeno con un positrón en vez de un protón, que vive 10^{-10} o 10^{-7} segundos, dependiendo del momento angular total del sistema.

Quarks de colores

Falta explicar por qué los hadrones solamente están formados por combinaciones de tres quarks qqq (bariones) o tres antiquarks $\bar{q}\bar{q}\bar{q}$ (antibariones) o bien un quark y un antiquark $q\bar{q}$ (mesones), pero no hay estados ligados de dos quarks o cuatro quarks, por ejemplo. Hay otras posibilidades descubiertas en los últimos años, que no invalidan el argumento, hadrones muy raros («exóticos»): *tetraquarks* ($qq\bar{q}\bar{q}$) y *pentaquarks* ($qqqq\bar{q}$).

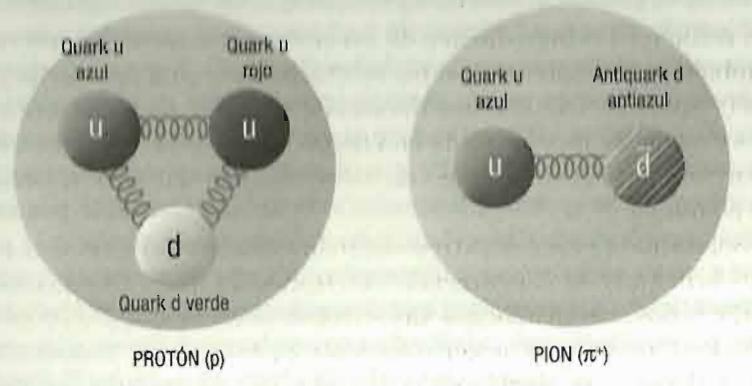
La respuesta es muy reveladora porque nos permite al mismo tiempo entender por qué no hemos visto nunca quarks aislados, sino siempre *confinados* en hadrones, y en definitiva comprender cómo funciona la interacción fuerte.

Cierto es que el quark t no está confinado, porque una vez producido decae débilmente (aunque muy rápido por ser muy pesado) a un quark b y a dos leptones o un par quark-antiquark.

Sin embargo, debido a la (en este caso más rápida) interacción fuerte, el quark b y los otros posibles quarks ligeros resultantes se convierten en un *chorro* de hadrones (*jet*) entre los que es imposible distinguir quarks aislados (figura 2). Y es que siempre que se produce un quark, rápidamente se rodea de otros quarks y antiquarks para formar hadrones, en un complejísimo proceso llamado *hadronización*. ¿De dónde se saca la energía necesaria para crear los quarks adicionales? Se toma «prestada» por un brevísimo instante. Otra vez el principio de incertidumbre.

La clave está en que, independientemente de su sabor, cada quark tiene una propiedad que denominamos *color*, un atributo que puede tomar tres valores. Los tres colores de los quarks son R (rojo, o *red* en inglés), G (verde, de *green* en inglés) y B (azul, de *blue* en inglés). Los antiquarks de cada uno poseen respectivamente los colores complementarios, \bar{R} , que es antirrojo o cian; \bar{G} , que es antiverde o magenta, y \bar{B} , que es antiazul o amarillo. Estos nombres, propuestos por Oscar W. Greenberg en 1964, nada tienen que ver con el color real de las cosas, pero son un modo ingenioso de llamarlos, porque imponemos que cuando se forma un hadrón, combinando quarks y/o antiquarks, este debe ser blanco, es decir sin color. Esto se consigue uniendo tres quarks de los tres colores primarios (R, G, B) o bien un quark y un antiquark de un color y su complementario ($R\bar{R}$, $G\bar{G}$, $B\bar{B}$), como en la figura 3. También es posible lograrlo en los tetraquarks y pentaquarks antes mencionados. Pero es imposible construir un hadrón sin color combinando un conjunto arbitrario de quarks o antiquarks. Y, por supuesto, un quark solitario tiene color, así que no sobrevive desnudo sino que debe hadronizarse, revistiéndose de otros quarks y antiquarks formando hadrones.

De modo que para cada uno de los seis sabores, u, d, s, c, b y t, no hay un solo quark sino tres: rojo, verde y azul (por ejemplo, del quark u tenemos u rojo, u verde, y u azul, o u_R , u_G , u_B). De esta manera se resuelve además una cuestión técnica muy importante: el principio de exclusión de Pauli determina que no puede haber dos fermiones idénticos en el mismo estado, sin embargo hay bariones, como Δ^{++} (uuu), Δ^- (ddd), Ω^- (sss), etc., que tienen tres quarks idénticos con sus espines apuntando en la misma



Colores posibles de los quarks de un barión (rojo, verde, azul) y de los de un mesón (azul y antiazul). En este caso, el barión es un protón (p) y el mesón es un pion (π^+).

dirección. Si ya no son idénticos, porque hay uno de cada color, desaparece el problema.

Durante algún tiempo se puso en duda que los quarks fueran entidades reales. Podrían haber sido simples reglas mnemotécnicas para clasificar los hadrones, pues nunca se había visto un quark aislado. La hipótesis del *confinamiento del color* (la carga total de color de una partícula tiene que ser nula, es decir, «blanca») justifica por qué nunca se puede arrancar un quark del interior de un hadrón. Pero eso no significa que no se pueda averiguar si ciertamente tienen «algo» dentro. Recordemos que en los experimentos de Rutherford se descubrió que el átomo tiene una subestructura sin necesidad de extraerle los electrones, protones y neutrones que lo componen. Bastaba con lanzar partículas de mucha energía contra el átomo, o en este caso el hadrón, y mirar si algunas se desviaban muy abruptamente, síntoma de que estaban «rebotando» en una zona más densa. Pues bien, a finales de la década de 1960, en una serie de experimentos realizados en el SLAC, en los que haces de electrones eran dispersados por protones, se confirmó que, en efecto, hay tres «grumos» en el interior del protón. Los quarks existen.

Leptones y quarks, en Interacción

En resumen, los ingredientes de los que está hecha la materia (y también la antimateria) son las excitaciones o cuantos, partículas (y antipartículas) de una docena de campos, media de leptones y media de quarks. Cada uno tiene distinto sabor. Sus masas abarcan un amplísimo rango de valores, como muestra la tabla de abajo.

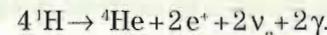
Solamente se necesitan tres «ingredientes» básicos para «cocinar» la materia estable ordinaria: electrones (e), quarks u y quarks d . Estos dos quarks nunca se sirven solos, siempre aparecen combinados formando un protón o un neutrón, dos tipos de hadrones. En cualquier otra combinación, los hadrones se desintegran. En realidad, el neutrón solamente es estable dentro de un núcleo atómico, que es a su vez una combinación (no siempre estable) de protones y neutrones. Los núcleos se rodean de electrones para formar átomos. Y los átomos forman moléculas, la mínima cantidad de materia con propiedades químicas bien definidas.

Los neutrinos no forman ninguna estructura, pues solo interactúan débilmente (son leptones y no tienen carga eléctrica) y encima tienen una masa especialmente pequeña. Pero son también un ingrediente necesario y el segundo más abundante del universo, después de los fotones (los cuantos de la luz). Hemos visto que los neutrinos se necesitan para explicar la radiación

Leptones			Quarks		
$J=1/2$	Q	Masa	$J=1/2$	Q	Masa
v_e	0	<0,000002	u	2/3	2
v_μ	0		d	-1/3	5
v_τ	0		s	-1/3	100
e	-1	0,511	c	2/3	1200
μ	-1	106	b	-1/3	4200
τ	-1	1777	t	2/3	173 000

Leptones y quarks. Masas en MeV/c^2 .

beta de los núcleos, un proceso en el que se transmutan protones y neutrones. Quizá la naturaleza podría haber prescindido de esta posibilidad, pero hay otro proceso importantísimo para nosotros que requiere de la interacción débil con la intervención del neutrino: la *fusión nuclear*, responsable del brillo del Sol y todas las estrellas. Se trata de varias cadenas de procesos pero, en esencia, 4 núcleos de hidrógeno (protones) se convierten en uno de helio (2 protones y 2 neutrones) acompañados de la emisión de dos positrones, dos neutrinos (para conservar carga eléctrica y número leptónico) y dos fotones:



Cinco millones de toneladas de masa solar cada segundo se convierten en fotones y neutrinos gracias a la fusión nuclear en su interior. Tras un tortuoso viaje desde el interior estelar, los fotones escapan del Sol y llegan hasta la Tierra, creando las condiciones necesarias para la vida. Y todo ocurre gracias a una reacción en la que los neutrinos, que también nos llegan, son protagonistas.

Los neutrinos siempre han estado ahí, pero nos ha costado mucho detectarlos, debido a que apenas interactúan. No solamente nos vienen del Sol o, esporádicamente, de explosiones de supernovas, también de las desintegraciones débiles de las partículas producidas por los rayos cósmicos en la atmósfera (sobre todo piones y kaones) y los producimos en reactores nucleares y aceleradores. Ahora incluso disponemos de telescopios de neutrinos, como el IceCube en la Antártida, con los que empezamos a detectar neutrinos de origen cósmico de mucha mayor energía. Son partículas muy interesantes. No decaen, pero experimentan un curioso fenómeno de oscilación en virtud del cual van cambiando su sabor ($\nu_e \leftrightarrow \nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$) mientras se propagan. Y además podrían ser el único fermión que es su propia antipartícula.

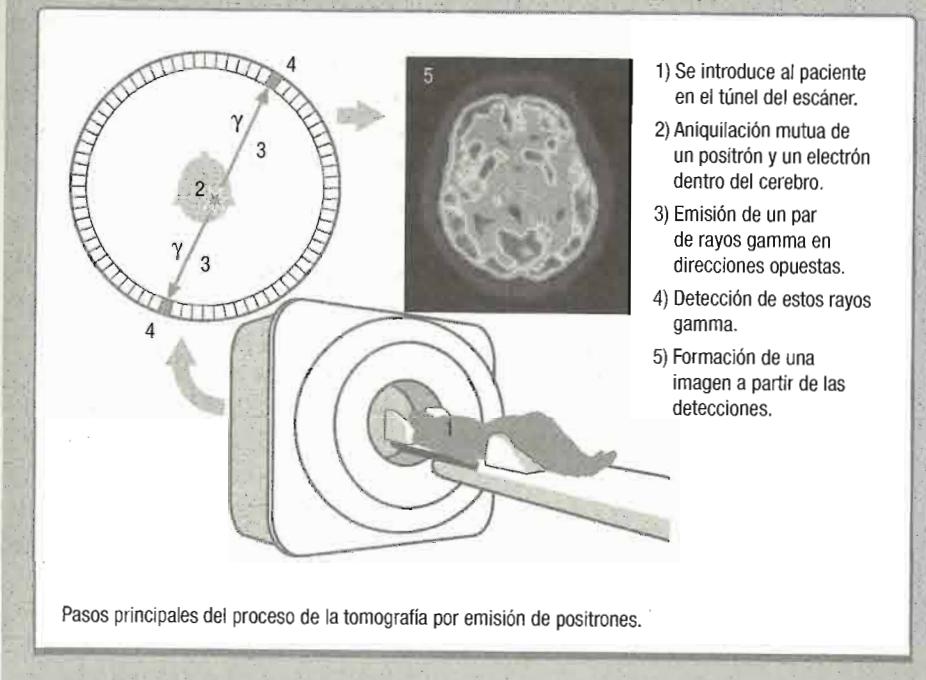
El resto de los ingredientes de la materia son leptones (muon y tau), hadrones (quarks ligados por la interacción fuerte) y el

LA ANTIMATERIA EN NUESTRAS VIDAS

El descubrimiento de la antimateria es un perfecto ejemplo de cómo la investigación básica, que busca el conocimiento y no la utilidad práctica, puede acabar aplicándose, en un plazo relativamente breve, en algo extraordinariamente beneficioso para la sociedad. Gracias a la antimateria se han ideado nuevos métodos de diagnóstico médico no invasivos.

Lucha contra el cáncer

Los tumores metabolizan la glucosa a mayor ritmo que los tejidos normales. Tras inyectar al paciente glucosa (FDG, fluorodesoxiglucosa) marcada con un radioisótopo emisor de positrones (flúor-18), el escáner PET (por las siglas en inglés de Positron Emission Tomography, tomografía por emisión de positrones) identifica las zonas donde hay mayor actividad. El proceso puede verse en la figura. Los positrones emitidos se aniquilan inmediatamente con los electrones del tejido circundante, creándose un par de rayos gamma (511 keV) en direcciones opuestas, que se detectan en coincidencia por las cámaras dispuestas en forma de anillo alrededor. Un ordenador reconstruye la imagen de alta resolución del corte transversal del paciente a partir de la concentración de las emisiones. El PET se usa también en otras aplicaciones clínicas relacionadas con el metabolismo cerebral, como el estudio de la epilepsia o la enfermedad de Alzheimer, o la cinética de drogas y fármacos.



quark t , que viven escasas fracciones de segundo, entre 10^{-9} segundos el primero y 10^{-10} segundos el último. Son adornos culinarios, aparentemente prescindibles, aunque enseguida veremos que el número de quarks es el mínimo necesario para posibilitar la simetría entre materia y antimateria en el universo.

Pero hace falta algo más que unos buenos ingredientes para cocinar un buen plato. No se puede entender el comportamiento de la materia sin introducir las interacciones.

La interacción electromagnética es responsable de la estabilidad del átomo, ligando los electrones a los núcleos, la formación de moléculas (enlaces químicos), las propiedades de la materia (en sus fases sólida, líquida o gaseosa), las corrientes eléctricas (las que van por los cables, las del impulso nervioso o los rayos de las tormentas), el magnetismo terrestre (que nos protege del viento solar y sirve para orientarnos usando la brújula) y, por supuesto, está detrás de toda la tecnología moderna. Si podemos empujar objetos, darle la mano a alguien sin atravesarlo o mantenernos de pie sin desplomarnos ni atravesar el suelo que pisamos, es gracias a la interacción electromagnética, pues los átomos están huecos. La repulsión electromagnética entre los electrones de las cortezas atómicas lo hace posible. Y, por si fuera poco, las oscilaciones del campo electromagnético son las portadoras de la energía que nos calienta y la luz que nos ilumina.

La interacción fuerte es responsable de la estabilidad nuclear, manteniendo unidos protones y neutrones en el núcleo atómico, y es capaz de formar hadrones, estados ligados de quarks y/o antiquarks, entre los que se encuentran protones y neutrones (nucleones). Casi toda la masa del átomo está en el núcleo y es esencialmente la suma de las masas de sus nucleones. Pero solo una ínfima fracción de la masa de los nucleones está en la masa de sus quarks componentes. El resto tiene su origen en la formidable energía de ligadura que los mantiene confinados en su interior. Así que la masa de las cosas que vemos, hechas de átomos, es en su gran mayoría «energía» debida a la interacción fuerte, una manifestación de la famosa equivalencia $E = mc^2$.

La interacción débil es culpable de gran parte de la radiactividad nuclear, concretamente de las desintegraciones beta de los núcleos. Los dos ejemplos que hemos visto al principio son de gran importancia: la degradación del carbono-14 nos permite datar muestras fósiles y los positrones de la radiación beta del flúor-18 se utilizan para diagnóstico médico mediante tomografía por emisión de positrones (PET). Y ya hemos hablado de su papel crucial en la fusión nuclear en las estrellas. También es relevante en la fisión nuclear, porque los productos de la fisión son inestables y suelen desintegrarse emitiendo radiación beta, lo que aporta energía adicional en forma de electrones, positrones y neutrinos.

A pesar de ser la fuerza dominante en el cosmos, la interacción gravitatoria no se necesita para ningún proceso a escala subatómica, al ser, con mucha diferencia, la más débil de las cuatro interacciones fundamentales. Se trata de una interacción atractiva de largo alcance experimentada por cualquier «cosa» que tenga masa o, en general, energía. Así que se va acumulando en objetos muy grandes, como estrellas y planetas, a diferencia de la fuerza electromagnética que, por ser atractiva o repulsiva dependiendo del signo de las cargas, acaba compensándose. La teoría de la relatividad general de Einstein la describe con gran precisión mediante un campo de interacción que representa la geometría del propio espacio-tiempo, que se deforma, estira y ondula alterando así las medidas de distancias e intervalos de tiempo. Sus variaciones tienen por tanto una interpretación distinta a las de cualquier otro campo, hasta el punto que puede decirse que la gravedad no es una fuerza. No disponemos de una teoría cuántica consistente que incluya a la gravedad, y por suerte no la necesitamos, excepto para describir procesos extremadamente energéticos que se dieron tras el Big Bang, cuando el universo era muy denso y estaba muy caliente. Los cuantos de este campo serían los *gravitones*.

Me gusta decir que si bien la antimateria puede parecer extraña, lo es en la medida que los belgas son extraños. No lo son realmente; es solo que raramente nos encontramos con ellos.

LAWRENCE M. KRAUSS

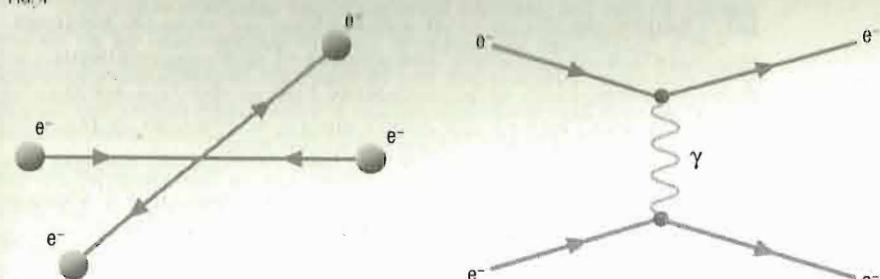
LOS MENSAJEROS DE LAS INTERACCIONES

Los campos de interacción son los transmisores de las fuerzas. Dos electrones lanzados uno contra el otro experimentan una fuerza de repulsión, aparentemente una misteriosa acción a distancia, porque existe el campo electromagnético, a través del cual perciben su presencia mutua intercambiando energía y momento. La señal que los comunica se «propaga» por el espacio y está cuantizada, pues consiste en paquetes discretos de energía, los cuantos del campo electromagnético (fotones). Los fotones (γ) son las *partículas mediadoras* de la interacción electromagnética (figuras 4 y 5).

Estos mensajeros de la interacción tienen el mismo derecho a llamarse «partículas» que los propios electrones, que por otro lado también son los cuantos de un campo. Los fotones intercambiados entre los dos electrones son *partículas virtuales*, no llegamos a verlos (figura 4). Pero también podemos producir *fotones reales* excitando el campo electromagnético de otras formas, como por ejemplo aniquilando un electrón y un positrón (figura 5), acelerando cargas (radiación térmica, sincrotrón, etc.) o mediante desexcitaciones atómicas y nucleares. Los fotones reales son detectables con el instrumento adecuado, como cualquier otra partícula de materia, y, si tienen una energía del orden del electronvoltio, los conocemos muy bien porque son parte de la luz que impresiona nuestras retinas, el fabuloso detector que llevamos incorporado.

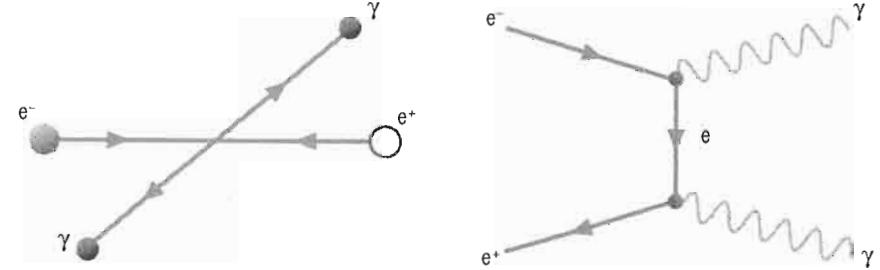
Para que una partícula sienta una interacción debe tener lo que llamamos carga, un atributo de los campos, que tiene signo opuesto en partícula y antipartícula. La carga necesaria para notar el campo electromagnético es la familiar *carga eléctrica*, Q . Pero para cada tipo de interacción hay un tipo de carga. Por tener carga eléctrica el campo del electrón se *acopla* al campo de la interacción electromagnética, el campo del fotón, con una «eficiencia» proporcional a la carga y a la denominada *constante de acoplamiento*, una propiedad del campo de interacción. En el caso del campo electromagnético, el acoplamiento se llama e ($1,6 \cdot 10^{-19}$ culombios en el Sistema Internacional de Unidades).

FIG. 4



Un fotón virtual que media la interacción electromagnética entre dos electrones. A la derecha, diagrama de Feynman que describe el proceso.

FIG. 5



Dos fotones reales producidos en la aniquilación de un par electrón-positrón. A la derecha, diagrama de Feynman que describe el proceso.

Así, decimos que los dos electrones de la figura 4 interactúan entre sí mediante el campo electromagnético, porque cada uno se acopla al fotón intercambiado, siendo la intensidad de su interacción mutua proporcional a $(eQ)^2$, pues hay dos vértices de interacción implicados.

Las cargas, sean del tipo que sean, *se conservan* en cada vértice de interacción. Nótese que el fotón no cambia la carga eléctrica de la partícula con la que se acopla. Por tanto, el fotón tiene carga cero. Y al no tener carga, el fotón no puede acoplarse directamente a otro fotón. Sin embargo, otros campos de interac-

ción si cambian las cargas, por lo que ellos mismos deben tener carga, lo que les permite interaccionar también entre sí.

Otra propiedad importante de una interacción es su alcance y en eso tiene mucho que ver la masa de la partícula mensajera, como ya se ha dicho al introducir los mesones como mediadores de la interacción fuerte entre los nucleones.

La interacción débil, responsable de la desintegración beta de los núcleos y las desintegraciones de neutrones, muones y piones, entre otras muchas, fue descrita inicialmente por Enrico Fermi mediante una interacción de contacto, en la que no se propagaba ninguna partícula mensajera (alcance efectivo «cero»). Pero, para que la teoría fuera consistente, se teorizó que debía haber un campo de interacción, con un mediador muy pesado, la partícula W, cuyo acoplamiento con quarks y leptones produjera el necesario cambio de sabor. La nueva teoría de las interacciones débiles es parte del modelo estándar, que no solamente predice la existencia de las W^\pm , que tienen carga eléctrica, sino también de otra partícula de masa parecida, la Z, ambas de espín 1.

Igual que pasa con el fotón, también debe ser posible «crear» las partículas mediadoras de las interacciones débiles como producto final de una colisión. Crear un fotón es facilísimo, pues al no tener masa no es necesaria una energía mínima, pero para producir partículas tan pesadas era necesario un acelerador de suficiente energía, capaz de alcanzar al menos mc^2 . El gran momento llegó en 1983, cuando ambas fueron descubiertas en el SPS (Super Sincrotrón de Protones) del CERN, que realizaba colisiones $p\bar{p}$ a una energía de 540 GeV, gracias a nuevas técnicas desarrolladas por Carlo Rubbia y Simon van der Meer. Una vez producidas, W y Z se desintegran inmediatamente, así que debe reconstruirse su masa a partir de sus productos de desintegración. Nótese que no toda la energía de protón y antiproton se invierte en producir la W o la Z (con masas de 80 y 90 GeV/c^2 , respectivamente) porque son los quarks, que portan una fracción de la energía, los que hacen el trabajo. Esto es típico de los colisionadores hadrónicos, cuyos haces pueden acelerarse hasta energías muy altas, sin grandes pérdidas por radiación sincro-

trón, que aprovechan solo parcialmente para producir nuevas partículas.

Queda hablar de los mediadores de la interacción fuerte. Inicialmente, Yukawa había introducido los piones como mediadores de la interacción entre los nucleones, lo que justifica el corto alcance de la fuerza que mantiene ligados a protones y neutrones en el interior del núcleo atómico. Pero al ir apareciendo nuevos mesones y conocerse su estructura interna, se hacía necesario explicar la fuerza nuclear como consecuencia de una interacción más «fundamental» entre los quarks y antiquarks que componen los mesones y el resto de los hadrones y que, en primera instancia, los mantienen ligados en su interior. La interacción responsable es tan complicada que se requiere no uno sino ocho campos para describirla. Son los campos de los gluones que hacen de «pegamento» nuclear.

Los gluones se acoplan a los quarks porque estos tienen la carga correspondiente, que no es otra cosa que el color, atribuido introducido para justificar por qué los hadrones aparecían en ciertas combinaciones de quarks y antiquarks, y que ahora adquiere un nuevo significado. Los colores de los quarks no están fijos en el hadrón, sino que se van intercambiando debido a la interacción fuerte, que conecta a los quarks de distinto color, de la misma forma que la interacción débil puede conectar quarks de distinto sabor. Esto implica que los gluones tienen también cargas de color. Como los vértices de interacción deben preservar la carga total, y hay tres colores posibles, hay $3 \cdot 3 - 1 = 8$ gluones bicolor que «repintan» el quark inicial para convertirlo en un quark de otro color (se ha restado uno, el bicolor «neutro», que dejaría a cualquiera de los tres colores como están).

En los hadrones, quarks y antiquarks se mantienen unidos porque intercambian gluones (virtuales), las imaginarias líneas en forma de muelle de la figura 3 (pág. 94). Los gluones también son los mediadores de las rapidísimas desintegraciones fuertes, como la de la partícula Δ^0 en la figura 6. Aunque ambas representaciones son solamente una imagen ingenua de lo que ocurre realmente.

Al tener color, como los quarks, los gluones nunca aparecen aislados. De hecho también se *hadronizan* nada más ser produ-

cidos, rodeándose de quarks y antiquarks y convirtiéndose en *jets*, chorros de hadrones, como los que forman los quarks. Un quark emite gluones, incluso más eficientemente que una carga eléctrica radia fotones, así que es posible que al producirse un par quark-antiquark (dos *jets*) se emita un tercer *jet*, procedente de la hadronización de un gluón emitido por uno de ellos. Un suceso de tres *jets*, como el de la figura 7, observado en 1979 en una colisión $e^+ e^-$ en el acelerador PETRA del laboratorio alemán DESY en Hamburgo, certificó la existencia real de los gluones.

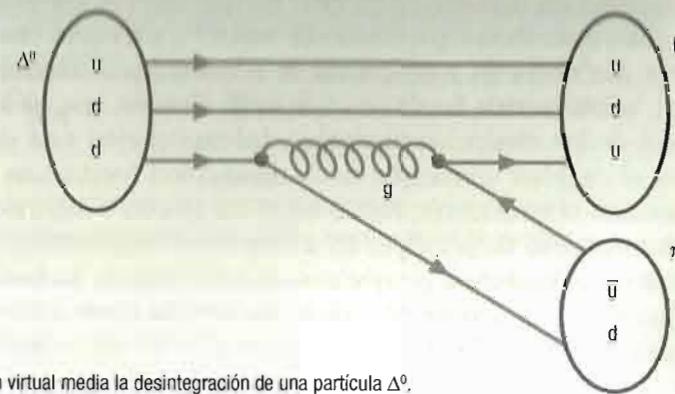
Y también por tener color, los gluones interactúan fuertemente consigo mismos, así que pueden formar estados ligados de gluones con gluones, llamados *bolas de gluones* (*glueballs* en inglés), que, como mesones y bariones, son conglomerados de color neutro (blancos). Las bolas de gluones son también hadrones exóticos, con propiedades particulares que permiten reconocerlos. De hecho, se han hallado un buen número de candidatos.

Ahora viene la pregunta del millón. ¿Qué tienen las interacciones fuertes que impide a quarks y gluones estar aislados? Hábiamos justificado que los quarks no pueden permanecer libres imponiendo el confinamiento del color, pero esto es solo una consecuencia de una propiedad de la fuerza que los mantiene unidos, la interacción fuerte mediada por los gluones. Si intentamos separar un quark de un hadrón, la fuerza que le liga al resto de los quarks aumenta con la distancia entre ellos, como si les uniera una goma elástica. La energía suministrada para intentar separarlos se acumula en el campo de interacción, los gluones, hasta que, si esta es suficiente, se invierte en las masas de un nuevo par quark-antiquark. Dicho de otra manera, un gluon es una goma elástica que tiene a dos quarks en sus extremos. Al estirarla mucho, llega a romperse en otras gomas, con otros quarks o antiquarks en los nuevos extremos libres. Y lo mismo pasa con los siguientes trozos, que pueden soportar tensiones cada vez más pequeñas.

Así que quarks (y antiquarks) siempre están unidos por gluones. Podría decirse que son como los dos polos de un imán, que por más que lo fragmentemos nunca pueden «separarse».

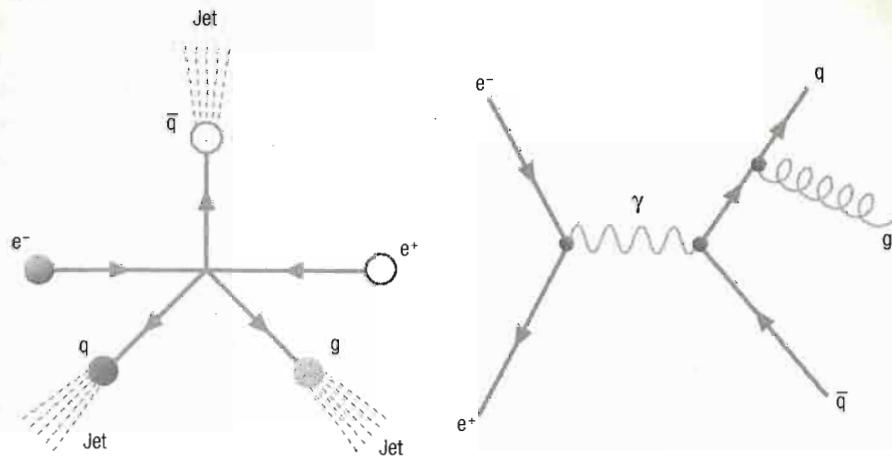
Por tanto, en un hadrón no solo están los llamados quarks de *valencia*, que definen su identidad, sino que además hay un

FIG. 6



Un gluón virtual media la desintegración de una partícula Δ^0 .

FIG. 7



Un gluón y un par quark-antiquark son producidos en una colisión electrón-positrón, cuya señal son tres *jets*. A la derecha, diagrama de Feynman que describe el proceso.

mar de quarks y antiquarks interconectados por infinidad de gluones.

Y, por otro lado, cuanto más cerca estén los quarks menor es la fuerza que experimentan, están cada vez más «libres», pues la

goma elástica no tira tan fuertemente de ellos. Es lo que se llama *libertad asintótica*.

Los gluones son partículas de espín 1 y sin masa, como el fotón. Sin embargo, a diferencia de la interacción electromagnética, la interacción fuerte no es de largo alcance, apenas llega más allá de las distancias nucleares. La explicación está de nuevo en el carácter confinante de la interacción fuerte. Los gluones median la interacción fuerte entre los quarks dentro de los hadrones, pero en principio no puede haber intercambio de gluones entre hadrones, porque son de color neutro. La fuerza entre nucleones es «remanente» de la interacción fuerte entre quarks, que se puede describir de forma efectiva mediante el intercambio de piones (mesones), sin color neto. Esta fuerza residual es más débil que la interacción fuerte fundamental, de la misma forma que las *fuerzas de Van der Waals* entre moléculas, que carecen de carga eléctrica neta, son más débiles que la interacción electromagnética entre iones cargados. Además, es de corto alcance porque «equivale» a intercambiar partículas con masa (la *teoría de Yukawa*). Y, finalmente, a diferencia de la interacción fuerte fundamental, mediada por gluones, esta fuerza residual disminuye con la distancia.

LA INTENSIDAD DE LAS INTERACCIONES

Haciendo balance, los mediadores de las distintas interacciones son también una docena de partículas: un fotón (γ) para la electromagnética; W^+ , W^- (la partícula y su antipartícula) y una Z para la débil, y ocho gluones para la fuerte (véase la tabla superior de la página siguiente). Gracias a ellas puede latir el corazón de la materia, tejido de seis leptones y seis quarks.

Hay que tener en cuenta las propiedades de estas interacciones para comprender su intensidad y alcance. En la tabla inferior de la página siguiente se muestran las intensidades relativas de todas ellas. En el caso de la interacción fuerte, distinguimos entre la fuerza fundamental (entre quarks) y la residual (entre hadrones), que están mediadas, respectivamente, por gluones y

Interacción	$J = 1$	0	Masa
Electromagnética	γ	0	0,0
Débil	W^+	± 1	80,4
	Z	0	91,2
Fuerte	8 gluones	0	0,0

Mensajeros de las interacciones fundamentales. Masas en GeV/c^2 . No se incluye la gravedad.

interacción	Gravedad	Débil	EM	Fuerte	
				Fundamental	Residual
Mediadores	Gravitón	W^+, Z	γ	Gluones	Mesones
Entre quarks	(1)	10^{-41}	1	1	25
	(2)	10^{-41}	10^{-4}	1	60
Entre protones	(3)	10^{-36}	10^{-7}	1	No aplica
	(4)	10^{-36}	*	1	20

Intensidades relativas de las fuerzas a distancias: (1) mucho menores que un protón (0,001 fm), (2) algo menores que un protón (0,03 fm), (3) del orden de un protón (1 fm), (4) mayores que un núcleo. Allí donde se indica con el asterisco (*), se rebasa su alcance.

mesones. Las comparamos a cuatro distancias representativas entre partículas que puedan «sentir» todas las interacciones, tomando la intensidad de la interacción electromagnética como referencia.

Dentro de un protón, a distancias del orden de la milésima parte de su tamaño, que viene a ser el tamaño de la longitud de onda de los electrones del LEP, la más pequeña que jamás hemos explorado hasta la puesta en marcha del LHC, la interacción fuerte es menos intensa que a distancias mayores. Esto se debe al carácter confinante de los gluones, cuyas «gomas elásticas» dejan más libres a los quarks cuando están cerca. En este dominio, la interacción débil es del mismo orden que la electromagnética a muy pequeñas distancias, pues sus constantes de

acoplamiento son esencialmente la misma, lo que se denomina *unificación electrodébil*. Pero, al ir aumentando la separación, la enorme masa de W^+ y Z pasa factura y la interacción débil se suprime exponencialmente respecto a la electromagnética.

A las distancias típicas entre nucleones, del orden del tamaño de un protón, ya no hay quarks ni gluones aislados, aunque sí una interacción residual mediada por mesones. Esta interacción sigue siendo más intensa que la electromagnética a esas distancias, pero debido a que los mesones tienen masa, disminuye exponencialmente y prácticamente se anula para separaciones del orden del tamaño de un núcleo. Más allá de las distancias nucleares, solo queda la interacción electromagnética y la gravedad.

Nótese que la interacción débil es siempre demasiado «débil» para formar estados ligados y que la gravitatoria es irrelevante para masas tan pequeñas.

La simetría dicta las interacciones

El origen de las interacciones no es un capricho de la naturaleza, es una consecuencia de su simetría. Y ha sido el convencimiento de que ese principio debe mantenerse a toda costa lo que nos ha llevado a comprender el origen de la masa de las partículas elementales, a partir de un mecanismo que predice otro campo muy especial, el campo de Higgs.

Todos tenemos una idea intuitiva del concepto de simetría, aunque ignoremos las bases matemáticas en las que se sustenta. En general, si al hacer una transformación sobre un «sistema» el resultado es indistinguible del original decimos que este presenta una simetría. La simetría es una propiedad de objetos materiales o entidades abstractas que expresa *invariancia* bajo transformaciones, como pueden ser traslaciones, rotaciones, reflexiones especulares, intercambios o cualquier otra «operación». Conocemos multitud de manifestaciones de la simetría en la naturaleza (redes cristalinas, simetría bilateral de muchos seres vivos y pentarradial en los equinodermos, formas esféricas perfectas de las perlas o las pompas de jabón) y también en creaciones humanas, como el arte o la arquitectura (los mosaicos de la Alhambra de Granada, la armonía en la música, etc.). Todas ellas nos transmiten una sensación de belleza y equilibrio.

Pero la simetría va mucho más allá del aspecto externo de las cosas. También hay simetría en las ecuaciones que rigen la dinámica de los sistemas físicos, que por otro lado suele ser la causante de la que exhiben los propios objetos naturales. El reconocimiento de estas simetrías no solamente simplifica la resolución

de problemas en física sino que, especialmente, inspira los principios básicos que subyacen a las leyes de la naturaleza.

Un buen ejemplo del poder de la simetría son los *sistemas cuánticos de partículas idénticas*. En mecánica clásica siempre podemos marcar y perseguir el movimiento de un conjunto de bolitas, aunque sean todas iguales. Sin embargo, en el dominio cuántico toda la información del sistema reside en su función de onda. Como no es posible conocer con total precisión la posición y el momento de cada partícula, no podemos saber cuál es cuál si son idénticas. Las funciones de onda reflejan este hecho, pero hay dos maneras de implementarlo: bajo el intercambio de posición de dos partículas idénticas cualesquiera, o bien quedan invariantes (simétricas), o bien cambian de signo (antisimétricas). En el primer caso, decimos que las partículas son bosones y en el segundo que son fermiones. El *comportamiento estadístico* de sistemas de muchas partículas idénticas es muy distinto en un caso o en el otro.

El principio de exclusión de Pauli, que ya hemos mencionado en otras partes del libro, según el cual dos fermiones idénticos no pueden hallarse en el mismo estado cuántico, es una consecuencia de la simetría de intercambio. Debido a esto, no puede haber dos electrones en el mismo orbital atómico, lo que entre otras cosas determina las «distintas» configuraciones electrónicas, que explican los elementos químicos de la tabla periódica. Y también gracias al principio de exclusión, ciertos tipos de estrellas (enanas blancas y estrellas de neutrones) pueden evitar el colapso gravitatorio.

Por otro lado, a diferencia de los fermiones, puede haber un número arbitrario de bosones idénticos en el mismo estado cuántico, lo que hace posible agregaciones de la materia llamadas *condensados de Bose-Einstein*, que explican fenómenos tales como el láser, la superfluidez y la superconductividad.

Recordemos que habíamos introducido el concepto de bosones y fermiones para referirnos al espín de las partículas. Ahora vemos que tiene su origen en el diferente comportamiento estadístico, que está motivado por la simetría de intercambio. La así llamada *conexión espín-estadística*, que establece que los

bosones tienen espín entero y los fermiones espín fraccionario, es un postulado (se impone) en mecánica cuántica pero puede deducirse de la teoría cuántica de campos, lo que constituye un éxito más de esta visión moderna de las cosas.

Existen otras simetrías de las ecuaciones de la física que tienen que ver con invariancias bajo transformaciones continuas de ciertas variables. Son particularmente relevantes las relacionadas con las *traslaciones temporales*, las *traslaciones espaciales* y las *rotaciones*: las ecuaciones no pueden depender de cuándo tomamos el origen de tiempos, o dónde situamos el origen de coordenadas o en qué dirección apuntamos nuestro sistema de referencia. Da igual hacer un experimento hoy o pasado mañana, aquí o en Honolulu, o con el laboratorio orientado hacia el punto cardinal que queramos, siempre que se haga en las mismas condiciones, naturalmente.

Lo más remarcable es que para cada *simetría continua* hay aparejada una *ley de conservación*, es decir, existe una cantidad conservada, que permanece constante. Este interesante resultado, debido a Emmy Noether (1882-1935), una eminente y a la vez gran desconocida matemática alemana, tiene una influencia enorme en la física teórica. Baste decir que las cantidades conservadas debidas a las simetrías antes mencionadas son, respectivamente, la energía, el momento lineal y el momento angular del sistema físico que describan las ecuaciones. ¡La ley de la conservación de la energía es consecuencia de una simetría!

Las simetrías continuas anteriores lo son bajo transformaciones de las coordenadas espacio-temporales (x, y, z, t). Pero también puede haber otras simetrías continuas bajo transformaciones de los campos, que llamamos *simetrías internas*. Según el *teorema de Noether*, estas también tienen asociadas cantidades conservadas que, en general, llamamos cargas.

Para hacernos una idea del significado de una simetría interna, imaginemos un sistema descrito por un campo que nos va a resultar muy familiar: un río que fluye entre montañas, cuyo perfil orográfico viene dado por $A(x, y)$, una función que a cada coordenada (x, y) del «plano» asocia una altura A . En este caso $A(x, y)$ es literalmente el «campo», el paisaje que observamos.

La dinámica del río viene especificada por la configuración del campo: en cada punto la corriente sigue la dirección en la que la altura se hace menor.

Podría pensarse que no hay mucha «simetría» en este sistema, pero no nos estamos refiriendo a las simetrías de las montañas sino a la de las ecuaciones que determinan por dónde fluye el río. Si elevamos todo el paisaje una altura h , arbitraria pero la misma en todos los puntos, el río seguirá exactamente el mismo cauce. Por tanto, hay una simetría, las ecuaciones del río son invariantes bajo la *transformación global* del campo $A(x, y) \rightarrow A(x, y) + h$. Y hay una «carga» conservada, el caudal del río, que permanece constante.

Si en cambio hacemos una *transformación local* del campo, consistente en elevar el paisaje una cantidad $h(x, y)$, distinta en cada punto, el río cambiará su curso, las ecuaciones ya no serán invariantes. Para conseguir que la simetría también se dé bajo transformaciones locales, tenemos que introducir una fuerza compensadora (*campo de interacción*) que ante cualquier variación local de altura «empuje» al río en la dirección adecuada para devolverlo a su cauce original. Nótese que el campo de interacción necesario viene perfectamente determinado por cuál es la simetría que se desea mantener. Llamamos *simetrías gauge* (de calibre o aforo) a estas simetrías locales y *campos gauge* a los campos de interacción que se requieren para preservarlas.

La gran revolución consiste en explicar el origen de las interacciones fundamentales como manifestaciones de las simetrías gauge del universo. Este es el principio básico que nos guía: las simetrías dictan las interacciones.

El ejemplo anterior es solo una metáfora que nos ha servido para ilustrar el procedimiento. El caso realista más sencillo, debido a la simetría interna más simple, corresponde a la interacción electromagnética. Las ecuaciones del campo del electrón poseen una cierta simetría interna global, que conduce a la conservación de la carga eléctrica. Su nombre matemático es U(1). Para que esta simetría sea también local, ha de introducirse un campo gauge que se acopla al campo del electrón, proporcionalmente a su carga. Este campo resulta ser exactamente el campo

EMMY NOETHER, LA MATEMÁTICA INCOMPRENDIDA

El mismísimo Einstein la definió como «un genio creativo de las matemáticas». Para cualquier científico recibir semejante reconocimiento implicaría todo un honor. Pero en el caso de Emmy Noether adquiere además un valor extraordinario, pues ser mujer y dedicarse a la ciencia en el siglo pasado no era tarea sencilla.

De los idiomas a las matemáticas

Aunque inició su formación académica como profesora de idiomas, nunca sintió realmente la vocación para dedicarse a ello. Su padre era un distinguido profesor de matemáticas en su ciudad natal y ella, pese a que el primer año le fue negado el acceso a la Universidad, acudió como oyente a sus clases, logrando después matricularse (entre mil estudiantes, solo había dos mujeres), obtener un brillante doctorado y ejercer como profesora, aunque no de manera oficial.

Una carrera llena de obstáculos

Trabajó siete años sin remuneración en el prestigioso Instituto de Matemáticas de Erlangen, su ciudad alemana natal, y posteriormente en la Universidad de Göttinga, donde durante cuatro años tuvo que dar clases en nombre de otro profesor. Allí colaboró con ilustres matemáticos, contribuyendo decisivamente al desarrollo del álgebra abstracta y la física teórica. Su ascendencia judía, en el entorno de la Alemania nazi, supuso un obstáculo más en su ya tortuoso desarrollo profesional. Sin poder impartir clases ni dar conferencias por prohibición expresa, decidió exiliarse a Estados Unidos, donde continuaría su labor docente e investigadora hasta su fallecimiento en 1935, con tan solo cincuenta y tres años.

Emmy Noether en una fotografía tomada hacia 1910.



electromagnético. Podría decirse que el campo electromagnético, y los del resto de las interacciones, están ahí para preservar las simetrías gauge del universo.

Pero no todas las simetrías internas son gauge. Hay otras, que también conducen a la conservación de «cargas» como el número bariónico o el número leptónico, que son simplemente simetrías globales, no están relacionadas con las interacciones.

Finalmente, hay otras transformaciones de simetría importantes que no son continuas (simetrías discretas). Están asociadas a un cambio brusco de alguna variable. Las más importantes son la *conjugación de carga* (C), cambio de signo de todas las cargas; la *inversión de paridad* (P), cambio de signo de las coordenadas espaciales, que equivale esencialmente a una reflexión especular; y la *inversión temporal* (T), cambio de signo del tiempo, que equivale a dar marcha atrás a la película de un proceso con una moviola. Decimos que existe simetría bajo cualquiera de estas transformaciones si cada proceso físico tiene la misma probabilidad de ocurrir que el proceso transformado.

Durante algún tiempo se pensó que todas las interacciones preservarían estas simetrías discretas. Pero en 1956, Tsung-Dao Lee y Chen Ning Yang predijeron la violación de P en las interacciones débiles, lo que fue comprobado experimentalmente poco después por Chien-Shiung Wu y sus colaboradores estudiando la desintegración beta del cobalto-60. A pesar del reconocimiento de sus colegas teóricos, la señora Wu no compartió con ellos su merecido premio Nobel de Física. La inversión de paridad intercambia derecha por izquierda (la imagen en un espejo invierte ambas) y en la desintegración beta anterior se vio que el antineutrino emitido solo tenía una de las dos posibles «quiralidades» que pueden tener las partículas de espín 1/2 (espín en la misma dirección o en dirección contraria al movimiento). La palabra quiralidad proviene del griego, «mano». El antineutrino es siempre «diestro». Por otro lado, en ningún proceso se ha observado nunca el conjugado de carga de este antineutrino, un neutrino diestro, sino siempre el neutrino «zurdo». El antineutrino diestro es el conjugado de carga del neutrino diestro, pues recordemos que C cambia de signo todas las cargas, también el número lepto-

tónico, aunque su carga eléctrica sea cero. Así que también se viola C, como P, ambas de forma extrema. Sin embargo, la acción combinada de las dos, CP, sí parecía una buena simetría, hasta que en 1964, James W. Cronin y Val L. Fitch descubrieron una pequeña violación de CP en procesos que involucran a los kaones neutros, de la que también es culpable la interacción débil.

La violación de CP es muy importante porque es uno de los requisitos imprescindibles (*condiciones de Sájarov*) para generar dinámicamente la *asimetría entre materia y antimateria* en el universo, pues no resulta satisfactorio suponer que desde el principio había más de una que de la otra. Partiendo de una situación inicial con igual cantidad de ambas, si existen procesos en los que se violan C y CP acabará habiendo más materia que antimateria (llamamos «materia» a la más abundante de ambas). No basta con la violación de C, preservando CP.

Por cierto, la acción combinada de las tres simetrías discretas, CPT, sí es una buena simetría de cualquier interacción en una teoría de campos cuánticos que sea compatible con la relatividad (teorema CPT). Esto implica que T se viola mínimamente, lo que no había podido ser verificado directamente hasta hace muy poco, en una factoría de mesones B en el SLAC. Este descubrimiento fue considerado, junto con el descubrimiento del bosón de Higgs ese mismo año, uno de los diez grandes avances de la física en 2012.

Quizá resulte chocante que la inversión temporal sea una simetría apenas violada en la naturaleza, cuando estamos acostumbrados a procesos irreversibles, que no se dan más que en una dirección del tiempo. La película de un vaso que cae al suelo, rompiéndose y desparramando su contenido, visualizada en orden inverso nos muestra un proceso que no ocurrirá nunca. Pero la causa de esta asimetría temporal macroscópica no reside en la irreversibilidad de los movimientos de cada partícula involucrada, que de hecho podrían darse en cualquiera de las dos direcciones, sino en la *segunda ley de la termodinámica*, según la cual todo proceso natural tiende a la máxima *entropía*, una medida del grado de desorganización de un sistema hecho de muchas partes.

¿CUÁLES SON LAS SIMETRÍAS DEL UNIVERSO?

Las simetrías gauge, que dan lugar a las interacciones, son el conjunto de transformaciones que dejan invariantes las ecuaciones de movimiento de los campos y están codificadas matemáticamente en un *grupo* que, igual que una partitura musical, puede leerse perfectamente si se conoce el lenguaje:

$$\text{SU}(3) \otimes \text{SU}(2) \otimes \text{U}(1).$$

No importa mucho lo que quieren decir esos símbolos, pero expresan de forma muy precisa cuántos campos de interacción hay que introducir para lograr que se mantenga la deseada simetría gauge. Se requieren un total de $8 + 3 + 1 = 12$ campos gauge, tantos como transformaciones de simetría independientes hay representadas por la expresión matemática anterior. En general, hay $n^2 - 1$ simetrías en cada $\text{SU}(n)$ y 1 en $\text{U}(1)$.

Los campos gauge de cada uno de los tres «factores» corresponden a un mismo «tipo» de interacción, y tienen una misma constante de acoplamiento. Las llamaremos g_s , g y g' , respectivamente. Estas constantes modulan la intensidad de las respectivas interacciones entre los campos de materia, así como las autointeracciones entre los campos gauge de un mismo subgrupo de simetrías, que están perfectamente fijadas por estas.

Los *campos de materia*, todos fermiónicos (espín 1/2), tienen asignadas cargas respecto a cada uno de estos grupos de simetría, que expresan la intensidad relativa con la que se acoplan a los campos gauge, en proporción a la constante de acoplamiento correspondiente. Se llama color a la carga respecto al primer grupo, que puede tomar tres valores definidos de forma simbólica como R (rojo), G (verde) y B (azul); de ahí viene el 3 de $\text{SU}(3)$. Llamamos *isoespín débil* a la carga respecto al segundo grupo. Finalmente, la *hipercarga* determina la intensidad de la interacción con el campo gauge del tercero.

Los campos gauge también poseen cargas, por lo que pueden interaccionar entre sí. De hecho, la simetría obliga a que los cam-

pos gauge de la simetría $\text{SU}(3)$ se acoplen entre ellos. También lo hacen los tres campos gauge de la simetría $\text{SU}(2)$.

El isoespín débil (I) es muy parecido al espín, pero no se refiere a las rotaciones en el espacio, sino a una especie de rotación interna entre los $2I + 1$ miembros de un multiplete de partículas, un doblete si $I = 1/2$. Todo encaja si agrupamos precisamente en parejas los campos conectados por la interacción débil. Por ejemplo, el electrón (e) y su neutrino (ν_e), o el quark u y el quark d, como puede verse en la tabla de abajo, donde el patrón se repite para las otras dos familias de quarks y leptones. En realidad, son los quarks y leptones «zurdos» los que forman un doblete de isoespín; los «diestros» tienen isoespín cero. Así que solamente los zurdos se acoplan a los campos gauge de $\text{SU}(2)$. De esta forma se implementa la violación de paridad (P).

Los quarks tienen carga de color. Pero los leptones son de color neutro, por lo que no sienten la interacción fuerte. En realidad no hay un quark de cada tipo, sino tres, uno de cada color, como se aprecia en la tabla, todos ellos conectados por la interacción fuerte.

Materia	Familias						
	I	II	III	Q	L	B	
Espín 1/2	Leptones	ν_e	ν_μ	ν_τ	0	1	0
		e	μ	τ	-1	1	0
	Quarks	u rojo, u verde, u azul	c rojo, c verde, c azul	t rojo, t verde, t azul	2/3	0	1/3
		d rojo, d verde, d azul	s rojo, s verde, s azul	b rojo, b verde, b azul	-1/3	0	1/3

Campos de materia del modelo estándar. Se muestran las cargas de color de los quarks y la estructura de dobletes (dos quarks y dos leptones por cada familia) que refleja el isoespín débil. También la carga eléctrica (Q), que es una combinación de isoespín e hipercarga, y otras dos cantidades conservadas: número leptónico (L) y número bariónico (B).

LA INTERACCIÓN ELECTRODÉBIL

Las interacciones electromagnética y débil se encuentran íntimamente relacionadas. Resulta que el campo del fotón (γ) no coincide con el campo gauge de la simetría U(1) sino que es una combinación (mezcla) en cierta proporción de este con uno de los campos gauge de la simetría SU(2). La otra combinación independiente resultante de esa mezcla es el campo del bosón Z. El hecho de que ambos grupos de simetrías se hallen mezclados se denomina *unificación electrodébil*. Los dos campos restantes de la simetría SU(2) son conjuntamente el campo de los bosones W⁺ y W⁻ (partícula y su antipartícula), que junto con el bosón Z se llaman *bosones débiles*.

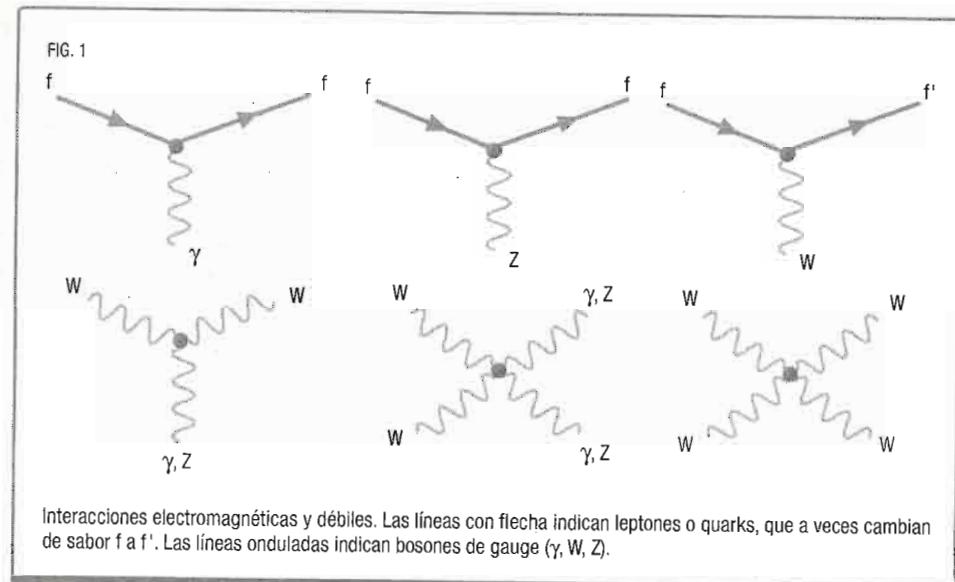
La carga eléctrica (Q) de un campo, que determina la intensidad con la que este se acopla al campo electromagnético, el del γ , es por tanto proporcional a una combinación de su isoespín débil y su hipercarga. La correspondiente combinación de los acoplamientos g y g' es el acoplamiento electromagnético, e , que determina la unidad de carga, la *carga eléctrica fundamental*. Al hablar de la carga de un campo siempre nos referimos a la que tenga la partícula asociada al campo. La carga de su antipartícula es igual y de signo contrario. Los quarks tienen carga eléctrica fraccionaria pero, como nunca aparecen aislados sino en estados ligados de tres quarks o de un quark y un antiquark, no se dan partículas libres de carga eléctrica menor que la fundamental. Los neutrinos tienen carga eléctrica nula, no sienten la interacción electromagnética, tampoco la fuerte, pero sí la interacción débil, aunque solamente los zurdos, porque los diestros no se acoplan (son estériles, o simplemente no existen).

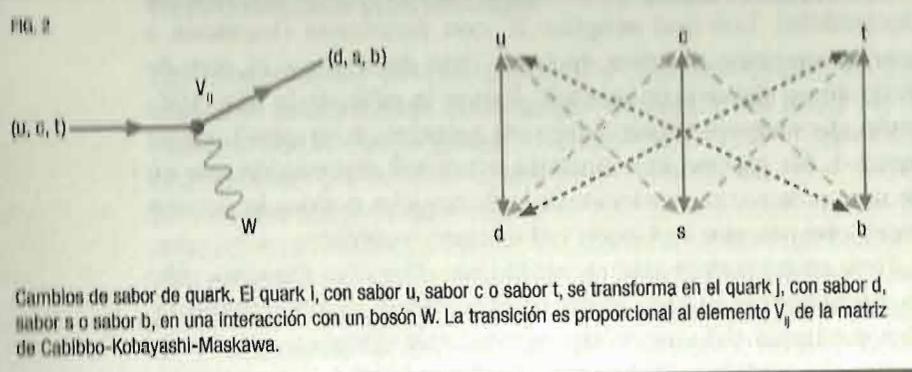
Ya se ha dicho antes que los tres campos gauge de la simetría SU(2) interactúan entre sí. Como uno de ellos es una combinación del campo del γ y el del Z, la simetría obliga a que ambos interactúen con el campo de los otros dos bosones débiles, W⁺ y W⁻. Los bosones W tienen por tanto carga eléctrica, pues sienten el campo electromagnético transmitido por el γ . En cambio el bosón Z es neutro, no se acopla al γ , si no hay además W en el vértice.

En la figura 1 se muestran todos los vértices de interacción electrodébil. Los que acoplan W con fermiones (leptones o quarks) cambian el sabor de f a f', uno de arriba y el otro de abajo de un doblete de isoespín (véase la tabla de la pág. 119), como por ejemplo un electrón y su neutrino, o un quark u y un quark d. Se impone una simetría adicional que impide que en un mismo vértice interactúen leptones con quarks: la conservación del número leptónico y el número bariónico.

Pero nada impide que se «mezclen» distintas familias. Eso es precisamente lo que ocurre en el sector de quarks (figura 2), donde además del cambio de sabor puede darse un cambio de familia. La amplitud de la transición de un quark i a otro j es proporcional al correspondiente elemento V_{ij} de la llamada *matriz de Cabibbo-Kobayashi-Maskawa* (CKM),

$$V_{\text{CKM}} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix}$$





Esta mezcla entre familias tiene notables consecuencias. Si solamente hubiera dos familias de quarks, las transiciones posibles serían 2×2 y los cuatro elementos podrían parametrizarse en términos de solamente un ángulo de mezcla, el ángulo de Cabibbo. Pero en 1973, antes de que hubiera vestigios de la existencia de una tercera familia, Makoto Kobayashi y Toshihide Maskawa se dieron cuenta de que la violación de CP observada pocos años antes podría explicarse con interacciones débiles si además de u, d y c, s hubiera otra pareja, t, b, que se mezclara con las anteriores, porque en tal caso la mezcla es más rica: tres ángulos y, especialmente, una fase *compleja* (los números complejos aparecen frecuentemente en la teoría cuántica). Es esta última la responsable de que un proceso y su transformado bajo CP no se den con la misma probabilidad. Este descubrimiento, el origen de la violación de CP, refrendado en distintos experimentos posteriormente, valió a los dos japoneses, treinta y cinco años más tarde, el premio Nobel de Física, que no recibió su colega italiano, Nicola Cabibbo.

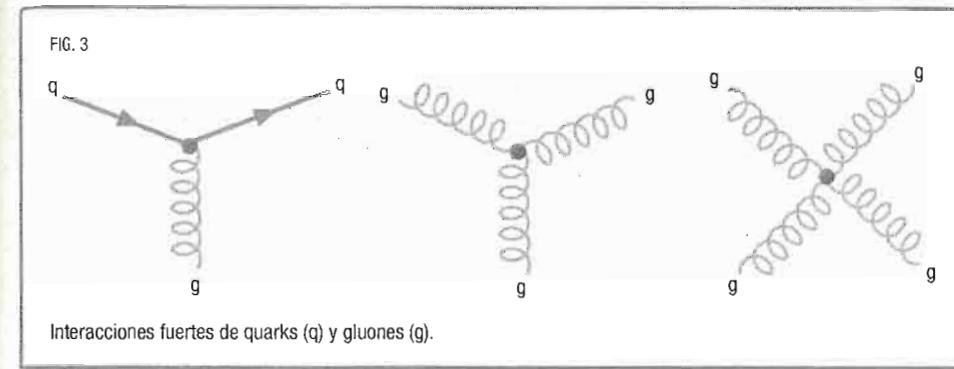
También existe una mezcla análoga en el sector de leptones y es necesaria para explicar las oscilaciones de sabor de los neutrinos, aunque si estos fueran su propia antipartícula tendría un origen muy distinto. Se llama *matriz de Pontecorvo-Maki-Nakagawa-Sakata* (PMNS). Curiosamente, de nuevo un italiano entre varios japoneses.

LA INTERACCIÓN FUERTE

Los ocho campos gauge de la simetría SU(3) son los campos de los ocho gluones, que se acoplan a los quarks y también entre sí en los vértices de interacción que muestra la figura 3. Los quarks tienen carga de color, que es intercambiada en la interacción con gluones «bicolor» (color-anticolor), de modo que la carga se conserva.

Para comprender el origen del extraño comportamiento de la interacción fuerte, cuya intensidad tiende a cero a distancias muy pequeñas pero se hace infinitamente grande a distancias del orden del tamaño de un protón, tenemos que saber que las correcciones cuánticas a la propagación de los mediadores de las fuerzas hacen que, de forma efectiva, las «constantes» de acoplamiento varíen con la escala a la que observamos un proceso, lo que se denomina *running*. Estas correcciones cuánticas a la propagación de los mediadores son análogas a las que experimenta un electrón y ya describimos al final del capítulo 3.

Comparemos las interacciones electromagnética y fuerte con acoplamientos e y g_s , respectivamente. Ya sabemos que la intensidad de la fuerza es proporcional al cuadrado del acoplamiento, y como en ambos casos los mediadores (fotón y gluon) son partículas sin masa, aquella cae con el cuadrado de la distancia, de la misma forma para las dos. Así que solamente difieren en un factor global α y α_s , constantes proporcionales a e^2 y g_s^2 , que se definen por conveniencia.



La primera es la *constante de estructura fina* cuyo valor experimental es aproximadamente $\alpha \approx 1/137$. Esto es a distancias moderadamente grandes (bastan unos cuantos fermis),

Si no cometes errores es porque no trabajas en problemas suficientemente difíciles. Y eso es un error.

FRANK WILCZEK

porque cuando se mide con sondas muy energéticas, que resuelven distancias muy pequeñas, su valor es mayor. Por ejemplo, $\alpha \approx 1/128$ a distancias del orden de 10^{-18} m (0,001 fermis). La razón es que en su propagación entre dos cargas, el fotón «polariza» el vacío, creando pares

electrón-positrón (correcciones cuánticas al propagador del fotón) que rodean a la carga fuente, apantallándola. Así, el valor de la *carga efectiva*, que es proporcional a e , es tanto menor cuanto más nos alejemos de la *carga desnuda*, como resultado del *apantallamiento*.

Sin embargo, las correcciones cuánticas al propagador del gluon hacen que α_s tenga el comportamiento contrario. El gluon no solamente produce pares virtuales quark-antiquark sino también otros gluones, debido a los *autoacoplamientos* determinados por la simetría gauge. Ambas correcciones a la propagación del gluon tienen signo opuesto. Mientras el número de sabores de quarks sea inferior a 16 (hay 6) el *antiapantallamiento* de las cargas de color es el efecto dominante. Es por esto que la interacción se hace cada vez más débil cuanto más cerca se encuentren los quarks (libertad asintótica) y, como contrapartida, hay una separación a la que α_s se hace infinitamente grande (*confinamiento*). La escala a la que tiene lugar esto último es una predicción de la teoría, una vez que midamos α_s a otra escala. El éxito de la teoría es espectacular: $\alpha_s = 0,1185$ a distancias de la milésima parte del tamaño de un protón, crece con la distancia y se hace infinita a un fermi aproximadamente, ¡el tamaño del protón, justo lo que necesitamos! El descubrimiento en 1973 de este comportamiento de los campos gauge de SU(3) hizo merecedores a David Gross, David Politzer y Frank Wilczek, todos ellos físicos estadounidenses, del premio Nobel de Física tres décadas más tarde.

EL PROBLEMA DE LA MASA

Acabamos de describir las interacciones electromagnéticas, débiles y fuertes en términos de campos gauge, cuyas propiedades quedan perfectamente definidas por las simetrías que preservan. Es verdaderamente remarcable que tal cosa sea posible y a la vez una sublime manifestación de la belleza del universo que, más allá de expresarse a través de la estética de sus estructuras, determina la dinámica de sus procesos.

Sin embargo, hay algo que no hemos dicho. La masa no se lleva bien con la simetría gauge. Para que las ecuaciones de nuestros campos de materia y de interacción sean simétricos, ninguno de sus cuantos puede tener masa. Es más, el hecho de que la masa de fotones y gluones sea estrictamente cero puede considerarse una consecuencia de la simetría.

La inmensa mayoría de la masa de la materia ordinaria proviene de la energía de ligadura de los quarks de los que se componen protones y neutrones. La masa de los quarks u y d y los electrones es en proporción poco importante. Pero si no la tuvieran, la relatividad nos dice que se moverían a la velocidad de la luz, con lo que sería imposible que jamás llegaran a formar núcleos y átomos. Además, la elevada masa de los bosones W y Z es fundamental para explicar el corto alcance de la interacción débil.

Sería una verdadera pena tener que renunciar a la simetría, un principio tan fértil, que conduce de forma tan elegante y precisa a la descripción de la materia y sus interacciones. Pero hay una vía de escape, otra idea genial que devuelve al universo su belleza y simetrías intrínsecas, una forma de explicar el origen de la masa de las partículas elementales, sin estropear la simetría. La clave es...

LA ROTURA ESPONTÁNEA DE LA SIMETRÍA

Imaginemos una bolita colocada justo en la cima de un exprimidor de naranjas, como en la figura 4. A pesar de ser una situación perfectamente simétrica, está claro que la bolita no se va a quedar ahí, sino que caerá a algún lugar del valle y al hacerlo la

FIG. 4

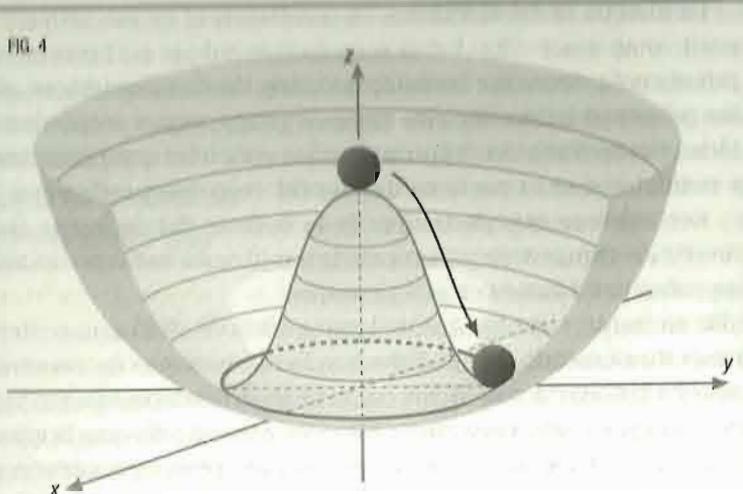


Ilustración de una rotura espontánea de la simetría. En los ejes x e y se lee la posición de una bolita sobre un exprimidor de naranjas (la altura z queda fijada), o bien el valor de dos campos escalares (cuya energía potencial se representa en el eje z).

simetría inicial se habrá roto. Si repitiéramos muchas veces el experimento de poner una bolita en la cima, observaríamos que esta siempre cae, pero no a un sitio fijo sino a uno cualquiera, lo que expresa que en el fondo sí que hay una simetría, aunque esté oculta. No hay nada de especial en el punto del valle en el que cae la bolita, lo especial es que hay muchos y que todos son equivalentes, conectados por una simetría. Decimos que esa simetría se ha roto espontáneamente, aunque sería más correcto decir que está latente.

En este ejemplo la simetría espontáneamente rota es una simetría continua, una rotación en torno al eje del exprimidor. Pero se dan casos similares de simetrías discretas que se rompen espontáneamente, como por ejemplo cuando nos sentamos a una mesa con comensales a ambos lados y tenemos que decidir si nuestro bollo de pan es el que está a la izquierda o a la derecha: da igual, pero una vez se elige uno, se rompe la simetría, lo que tiene sus consecuencias.

La idea de mantener una simetría (latente) en las ecuaciones pero romperla en los estados es la que subyace al mecanismo por el cual podemos conseguir que algunos campos tengan masa sin renunciar a las simetrías gauge, que se rompen «solo» espontáneamente. Para ver cómo se implementa necesitamos primero entender qué es el *vacío* en una teoría de campos cuánticos.

Recordemos que partículas (y antipartículas) son excitaciones de los campos que se propagan por el espacio como ondas en un estanque. Para excitar un campo hay que comunicarle energía, un mínimo de $E = mc^2$ si los cuantos de ese campo son de masa m . El estado de mínima energía del sistema corresponde a aquella configuración de los campos en la que no se ha excitado ninguna partícula. Generalmente el estado de mínima energía es único y corresponde a que todos los campos valgan cero. A ese estado se le llama «vacío», pues se caracteriza por la ausencia de toda partícula.

Supongamos que además de todos los campos de materia e interacción que hemos descrito hasta ahora, introducimos dos campos más que interactúan entre sí, de forma tal que si representamos gráficamente (eje z) el valor de la energía (potencial) en función del valor de los dos nuevos campos (ejes x y y) obtenemos un exprimidor como el de la figura 4. El estado de mínima energía no corresponde a la configuración en la que los campos valen cero, sino a una cualquiera de las situadas en el valle, todas igualmente válidas gracias a la simetría. Sea cual sea el mínimo elegido, se rompe la simetría, y se convierte en el vacío sobre el que se excitan los cuantos de ambos campos. Pero como el estado de mínima energía es tan peculiar, hay dos tipos de excitaciones posibles: unas «angulares» alrededor del eje, sobre el valle del exprimidor, y otras «radiales», ascendiendo por las paredes de este. Las primeras no cuestan energía, pues todos los estados en esa dirección tienen la misma, así que corresponden a cuantos de masa cero. Las segundas requieren energía, así que son cuantos con masa.

Estos campos que hemos introducido para alterar las propiedades del vacío han de ser *campos escalares*, es decir, sin ningún tipo de componentes vectoriales o espinoriales, pues el vacío no puede poseer ninguna orientación espacial. Sus excitaciones

son por tanto bosones de espín 0. En general, la regla (*teorema de Nambu-Goldstone*) es que por cada simetría espontáneamente rota, que no deja invariante el vacío, hay un campo escalar que permanece sin masa, cuyas excitaciones se llaman *bosones de Goldstone*. En el ejemplo del exprimidor, solamente se rompe una simetría, la única que hay, cuando los campos escalares toman un valor no nulo en el vacío, lo que significa que uno de los dos campos no tiene masa. El otro sí.

EL MECANISMO DE HIGGS

La situación se vuelve más interesante si las simetrías son gauge, es decir, locales. Por el mismo procedimiento con el que se logra que los campos fermiónicos de materia experimenten interacciones fijadas por las simetrías gauge, se puede hacer que los campos escalares autointeractantes de antes experimenten, además, interacciones con los campos gauge. La teoría completa sigue siendo perfectamente simétrica. Pero, por tener un valor no nulo en el vacío, estos campos romperán espontáneamente algunas de esas simetrías gauge, lo que ahora tiene un efecto novedoso y muy bienvenido.

Ya hemos visto que cada simetría gauge tiene asociado un campo de interacción cuyo bosón de gauge no tiene masa y que cada simetría rota espontáneamente conlleva la existencia de un bosón de Goldstone, sin masa. Pues bien, gracias a la simetría gauge los bosones de Goldstone pueden ser absorbidos, en cada punto del espacio, y los bosones de gauge correspondientes adquieren masa. Dicho de forma coloquial, los bosones de gauge asociados a las simetrías rotas engordan al «comerse» los bosones de Goldstone. Más técnicamente, se trata de una reparametrización de los campos que permite eliminar completamente del espectro a los bosones de Goldstone, que físicamente no existen. Sí que tienen existencia real el resto de los campos escalares, que además tienen masa, pues, como hemos visto antes, cuesta energía excitarlos. Estos últimos, que pueden ser uno o varios dependiendo del modelo, son los campos de Higgs «físi-

cos», cuyas excitaciones son los bosones de Higgs. Aunque se llama genéricamente «campo de Higgs» a todos.

Este mecanismo, consistente en introducir suficientes campos escalares con valor no nulo en el vacío para romper espontáneamente algunas simetrías gauge y así dotar de masa a los bosones de gauge correspondientes, fue propuesto en 1964 de forma independiente por Peter Higgs; Robert Brout y François Englert; Gerald Guralnik, Carl R. Hagen y Tom Kibble. Solamente Higgs (británico) y Englert (belga) fueron recompensados con el premio Nobel de Física 49 años después, tras el anuncio del descubrimiento del bosón de Higgs en el LHC del CERN en 2012.

El comité Nobel no puede conceder un mismo premio a más de tres personas, así que la decisión de quiénes debían ser galardonados fue difícil. Según parece, la justificación fue que los tres últimos (respectivamente dos estadounidenses y un británico) publicaron su trabajo un par de meses más tarde que los primeros, y Brout (estadounidense), que habría compartido el premio, murió en 2011, sin llegar a conocer la existencia del famoso bosón (nunca se otorga a título póstumo). Y claro, los miles de científicos que participan en los experimentos ATLAS y CMS del LHC, donde se descubrió el bosón de Higgs, están fuera de concurso.

Ha habido otros casos parecidos. Por su descubrimiento de la rotura espontánea de la simetría, Yoichiro Nambu compartió con sus paisanos Kobayashi y Maskawa el Nobel en 2008, lo que probablemente impidió que su colega Jeffrey Goldstone, cuarto en liza, obtuviera también los honores.

Sin embargo, aún no hemos terminado. Hemos logrado que tengan masa los bosones de gauge asociados a las simetrías espontáneamente rotas. Pero ¿cómo conseguimos que el electrón, los quarks y el resto de los leptones tengan masa? La respuesta es simple: basta con acoplar también estos campos fermiónicos al campo de Higgs con una interacción que respete la simetría gauge. La rotura espontánea de la simetría hace el resto. Como el campo de Higgs no es nulo en el estado de mínima energía, el vacío, esta interacción supone un lastre permanente al movimiento de los cuantos del campo fermiónico. Igual ocurre con los bosones de gauge. Si una partícula tiene masa es porque sien-

te el campo de Higgs. De alguna forma, es como si la partícula se desplazara por un espacio que no está realmente vacío sino ocupado por un medio misterioso que dificulta su movimiento. Pero el efecto que produce el campo de Higgs no equivale a una fuerza de rozamiento que frena a la partícula, sino que supone una contribución irreducible, mc^2 , a su energía total, $E = mc^2 + K$, una energía mínima que posee aunque no tenga energía cinética, K . Así que, con la misma energía, una partícula con masa tiene una velocidad menor que una sin masa. Y, si no tiene masa,

Cuando contemplas el vacío en una teoría cuántica de campos, no es exactamente nada.

PETER HIGGS

porque no siente el campo de Higgs, su velocidad es siempre la velocidad de la luz, como ya vimos.

La masa de cada fermión es arbitraria, proporcional al valor de su acoplamiento con el campo de Higgs. En cambio, la de los bosones de gauge está fijada por el acoplamiento gauge correspondiente. Esto permitió predecir, con acierto, que la masa de los bosones W debía ser menor que la del bosón Z.

Es oportuno plantearse por qué el campo de Higgs es tan especial, qué hace que sus autointeracciones tengan forma de exprimidor de naranjas, lo que conduce a un estado de mínima energía que rompe espontáneamente la simetría. En realidad, no fue «siempre» así. Cuando el universo acababa de nacer y era muy denso y caliente, el campo de Higgs era igual que todos los demás, tenía un mínimo de energía simétrico de valor cero. Todas las partículas tenían masa nula y se movían a la velocidad de la luz. Pero aproximadamente 10^{-10} segundos después del Big Bang, cuando la temperatura era de 10^{15} grados, se produjo un *cambio de fase*, como cuando el agua pasa de vapor a líquido. Al enfriarse el campo de Higgs se «condensó», adquiriendo un valor no nulo en el vacío. Hasta entonces las interacciones electromagnéticas y débiles tenían intensidades parecidas porque los bosones débiles no tenían masa, pero este cambio de fase rompió la simetría electrodébil e hizo pesados a los bosones débiles convirtiendo a la interacción débil en una muy diferente, poco intensa y de corto alcance.



Peter Higgs en las instalaciones del detector CMS, en el CERN.

EL MODELO ESTÁNDAR

Ya podemos presentar el modelo estándar de las interacciones electromagnéticas, débiles y fuertes, pues por fin conocemos todos los ingredientes necesarios (véase la imagen de las págs. 134-135). Se trata de una teoría gauge definida por el grupo de simetrías $SU(3) \otimes SU(2) \otimes U(1)$, que está roto espontáneamente de forma tal que los gluones y el fotón permanecen sin masa mientras que los bosones débiles W y Z y los fermiones elementales de la materia (leptones y quarks) adquieren masa mediante el mecanismo de Higgs. Gracias a que la simetría gauge está latente, todos los acoplamientos entre los campos de materia y los campos gauge (figuras 1 y 3) están perfectamente determinados, lo que permite describir con gran éxito una enorme variedad de fenómenos de la física de partículas. A estos acoplamientos hay que añadir los que involucran al campo de Higgs, que solamente interacciona directamente con los campos que tienen masa, siendo así como la adquieren.

La parte de $SU(3)$ se suele denominar *cromodinámica cuántica*, pues trata de las interacciones fuertes de campos con color, los quarks, con mediación de los gluones.

La parte restante, $SU(2) \otimes U(1)$, introducida en 1961 por Sheldon L. Glashow, describe las interacciones electromagnéticas y débiles, explicando además la unificación electrodébil. Aunque no fue hasta que Steven Weinberg en 1967 y Abdus Salam en 1968 incorporaron el mecanismo de Higgs para romper espontáneamente parte de estas simetrías, cuando la teoría fue consistente con la existencia de mediadores pesados, que justificaban el corto alcance de las interacciones débiles. Incluso antes de que W y Z fueran descubiertos en 1983 con las masas previstas, Glashow, Weinberg y Salam habían acumulado suficientes méritos para ganar su premio Nobel en 1979. En particular, se habían observado las «corrientes débiles neutras», mediadas por el bosón Z , análogas a las corrientes mediadas por el fotón pero de muy corto alcance, que hacían posible que los neutrinos fueran dispersados elásticamente por la materia a pesar de no tener carga eléctrica.

Para conseguir que se rompan espontáneamente solo las simetrías asociadas a las interacciones débiles se introducen cuatro campos escalares (técnicalemente, un doblete de campos escalares complejos) con autointeracciones similares a las representadas por el exprimidor de la figura 4, que al tomar un valor no nulo en el vacío rompen tres de las cuatro simetrías gauge de $SU(2) \otimes U(1)$. Así, los tres campos cuyas excitaciones habrían sido bosones de Goldstone sin masa son absorbidos engordando a W^+ , W^- y Z , que adquieren masa, mientras el campo escalar restante, el campo de Higgs físico, permanece y sirve de prueba de que este mecanismo está operando. Además de acoplarse con los campos gauge para darles masa, el campo de Higgs se acopla a los fermiones con el mismo fin.

Junto con los campos de materia (fermiones de espín 1/2) de la tabla de la pág. 119, los campos gauge (bosones de espín 1) y el campo de Higgs (bosón de espín 0) de la tabla inferior completan la lista de campos del modelo estándar.

Casi medio siglo después de la predicción de su existencia, el LHC ha encontrado el bosón de Higgs, la excitación de un campo escalar que se acopla a fermiones y bosones de gauge según lo previsto. No es una partícula cualquiera, sino la confirmación del mecanismo que origina las masas de las partículas elementales, y la última pieza del rompecabezas que faltaba (véase la imagen de las págs. 134-135).

La masa del bosón de Higgs es el resultado de la interacción del campo de Higgs consigo mismo. Como las masas de bosones

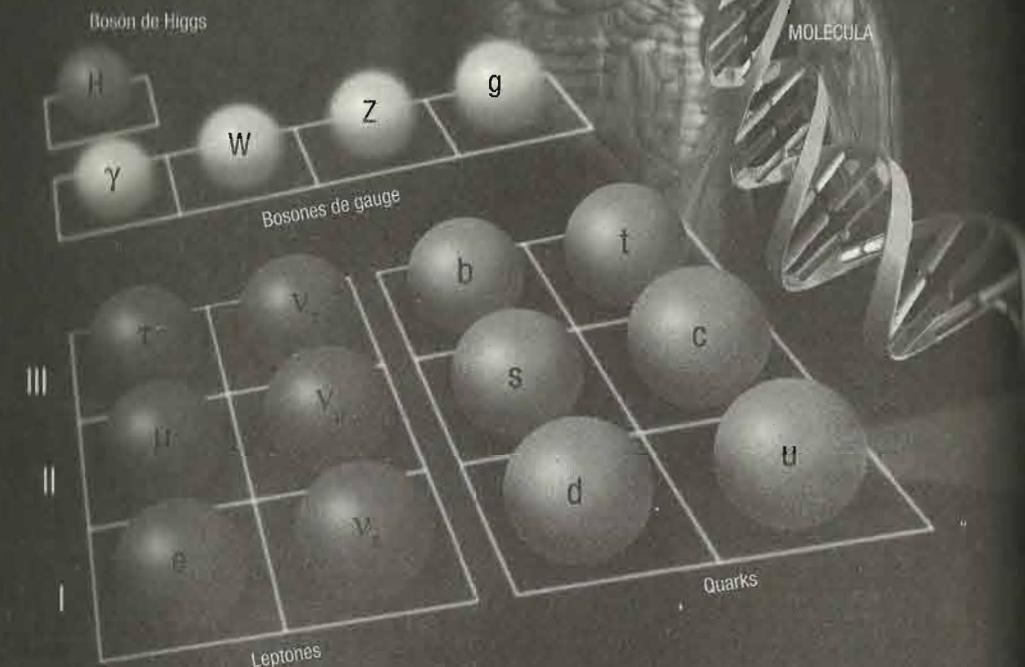
Interacciones		
Espín 1	γ	Interacción electromagnética
	W^+, Z	Interacción débil
	8 gluones	Interacción fuerte
Espín 0	Higgs	Origen de la masa

Campos de interacción del modelo estándar.

EL MODELO ESTÁNDAR COMPLETO

LOS PARTÍCULAS DE LA MATERIA

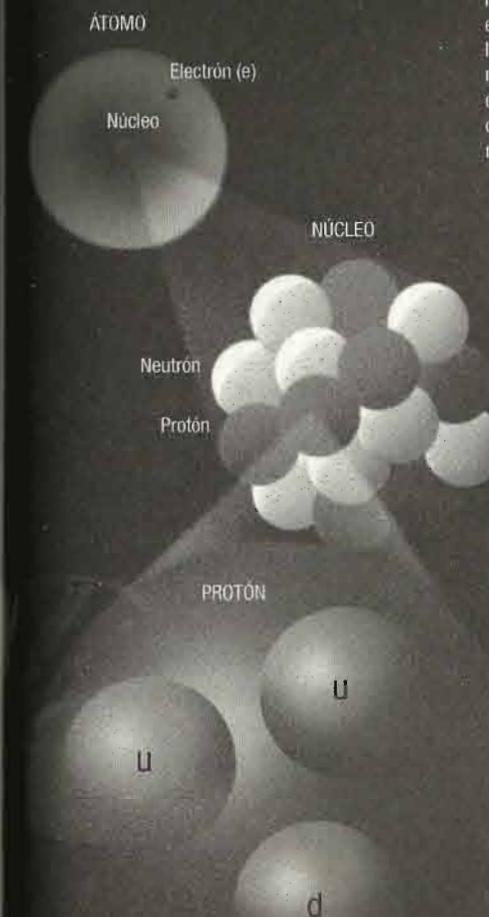
Hay doce tipos (isobores) de partículas elementales, tres familias de dos leptones y dos quarks. No son bolas, sino paquetes de energía (cuantos) de los campos de materia. Con el electrón (e^-) y los quarks (u y d) de la primera familia (I) se forma la materia ordinaria que reconocemos habitualmente: protones (uud) y neutrones (udd) componen el núcleo atómico, cuya envoltura está constituida por electrones. El neutrino (ν_e) aparece en reacciones nucleares. El resto son partículas efímeras que tras producirse desaparecen rápidamente.



LA SIMETRÍA DICTA LAS INTERACCIONES

LA ESTRUCTURA DE LA MATERIA

Los átomos, compuestos de protones y neutrones (a su vez compuestos de quarks) y electrones, se agrupan en moléculas, algunas tan complejas como el ADN, que codifica las instrucciones genéticas de los seres vivos. La materia no formaría estructuras ni experimentaría ningún proceso sin interacciones: la electromagnética cohesionaría átomos y moléculas; la fuerte mantiene ligados los quarks en protones y neutrones, y a estos dentro del núcleo atómico (también a los hadrones, otras combinaciones de quarks y antiquarks); la débil propicia la fusión nuclear en las estrellas y ciertas desintegraciones nucleares.



LOS MEDIADORES DE LAS INTERACCIONES

Las interacciones fundamentales se deben al intercambio de otras partículas elementales, los bosones de gauge, que son cuantos de los campos de interacción. Las interacciones electromagnética, débil y fuerte están mediadas por el fotón (γ), los bosones W y Z y ocho gluones (g), respectivamente. La luz está hecha de fotones que se propagan libremente. La masa, una forma de energía que poseen casi todas las partículas elementales, que lastra su movimiento, se debe a una interacción especial con el campo de Higgs, cuya excitación, el bosón de Higgs (H), también tiene masa porque este interacciona consigo mismo.

LA SIMETRÍA DICTA LAS INTERACCIONES

de gauge y fermiones, es proporcional al valor en el vacío del campo de Higgs. La constante de proporcionalidad es el parámetro que faltaba para determinar la forma exacta del exprimidor de la figura 4 (pág. 126), que solamente conocemos ahora que hemos medido la masa del famoso bosón, unos $125 \text{ GeV}/c^2$.

¿Ya lo sabemos todo?

Tras el descubrimiento de todos los ingredientes del modelo estándar podría parecer que ya no quedan misterios por resolver. Sin embargo, seguramente hay otros ámbitos fuera del alcance del poder de resolución de nuestros experimentos e ignoramos la composición y naturaleza de la inmensa mayoría de la materia y la energía del universo.

No se puede negar que hemos llegado muy lejos en nuestro ambicioso proyecto de descifrar las claves del universo. Pero no olvidemos que todo lo que hacemos es intentar formular leyes (ecuaciones) que describan nuestras observaciones, con la esperanza de que esto sea siempre posible. Al ir profundizando cada vez más en las entrañas de la materia, la aplicación estricta del método científico, carente de todo prejuicio, nos ha llevado a renunciar incluso a nuestra intuición, forjada en millones de años de evolución pero solamente adaptada al dominio accesible a nuestros sentidos. Los fenómenos que suceden a escala humana no despliegan tan a las claras las sutilezas que hemos ido descubriendo en otros contextos. Las nociones de espacio, tiempo, energía, masa, fuerza, incluso la influencia de la observación en los fenómenos físicos, han tenido que ser revisadas para poder comprender más y mejor el comportamiento de la materia y sus interacciones.

En el largo camino desde los presocráticos hasta nuestros días, ha habido hitos importantes que nos han obligado a cambiar completamente el enfoque. Quizá el primero fue la introducción y adopción del propio método científico por parte de

sus ilustres precursores, Galileo y Newton. Pero sin duda la gran revolución se produjo cuando hace poco más de un siglo el ingenio y atrevimiento de unos pocos científicos (Einstein, Planck, Heisenberg, Schrödinger, Dirac) nos regalaron la teoría de la relatividad y la teoría cuántica. No fue menor el progreso que supuso la constatación (Pauli, Schwinger, Feynman) de que las partículas son manifestaciones (excitaciones) de los campos cuánticos, una consecuencia natural de la conciliación entre la relatividad especial y la mecánica cuántica. El fotón es la única partícula que fue conocida como campo, el campo electromagnético, antes de ser detectada como partícula. La descripción de materia e interacciones en términos de campos cuánticos es una maravillosa realización de la aspiración suprema de la física, explicar todo con tan pocos elementos distintos como sea posible. Y también es un hito nada desdeñable el descubrimiento del principio que parece determinar el origen de las interacciones, la simetría, que lleva aparejado un mecanismo que permite comprender el origen de la masa de las partículas elementales, recientemente confirmado. Este es el marco general, el paradigma actual.

En este lenguaje se expresa el modelo estándar, una teoría cuántica de campos que lleva medio siglo describiendo, con gran éxito y extraordinaria precisión, la materia y las tres interacciones fundamentales relevantes a las escalas exploradas por nuestros aceleradores, un modelo incompatible con diminutas bolitas de materia que experimentan fuerzas a distancia, como erróneamente nos diría la intuición.

Todas las partículas del modelo estándar han sido descubiertas, desde el electrón (la primera) hasta sus primos muon y leptón tau, pasando por los esquivos neutrinos, los confinados quarks, el fotón, los bosones débiles, los gluones y el más buscado, el bosón de Higgs (el último).

Sin embargo, y a pesar de todo, estamos convencidos de que el modelo estándar es incompleto, por varias razones. Comenzaremos por las menos exigentes, omitiremos algunas que resultan demasiado técnicas y dejaremos para el final las que ponen en evidencia que nos queda mucho por entender.

CABOS SUELTOS

Llama mucho la atención que existan tres familias de partículas, de dos quarks y dos leptones, con las mismas propiedades, que solamente difieren en las masas. También les distingue su vida media, lo que es una consecuencia de la diversidad de masas, ya que con las mismas interacciones pueden decaer a las otras más ligeras. ¿Por qué tres?, ¿por qué no hay una familia?, ¿o catorce? Primero, sabemos que solamente hay tres, porque seguro que son tres los tipos de neutrinos (ligeros) a los que decae el bóson Z, según hemos medido con excelente precisión. Si hubiera otros más pesados, no encajarían en el mismo esquema. Por otro lado, conviene que haya al menos tres familias de quarks porque, como hemos visto, la mezcla entre al menos tres familias de quarks es la única fuente de violación de CP en el modelo estándar, lo que es una condición necesaria para que exista la evidente asimetría entre materia y antimateria en el universo. ¿Acaso tenemos tres, lo mínimo necesario, atendiendo a un principio no escrito de máxima economía?

Tampoco se explica por qué quarks por un lado y neutrinos por otro se mezclan de la forma en que lo hacen. Hay infinitos valores distintos que podrían haber tomado sus mezclas. Incluso podrían no haberse mezclado, lo que en particular sería nefasto en el caso de los quarks pues entonces CP sería una simetría preservada. Quizá exista una «simetría de sabor», que todavía no hemos acertado a descubrir, que explique el origen de las mezclas.

Las dos cuestiones anteriores están relacionadas entre sí y también con el hecho de que las masas de quarks y leptones (léase sus acoplamientos con el campo de Higgs) abarquen un rango de valores que cubre nada menos que cinco órdenes de magnitud, entre $0,511 \text{ MeV}/c^2$ el electrón y $173\,000 \text{ MeV}/c^2$ el quark t, y al menos otros cinco órdenes de magnitud si incluimos los neutrinos, cuya masa no es nula pero es inferior a $0,000002 \text{ MeV}/c^2$. Esto se conoce como *problema del sabor*.

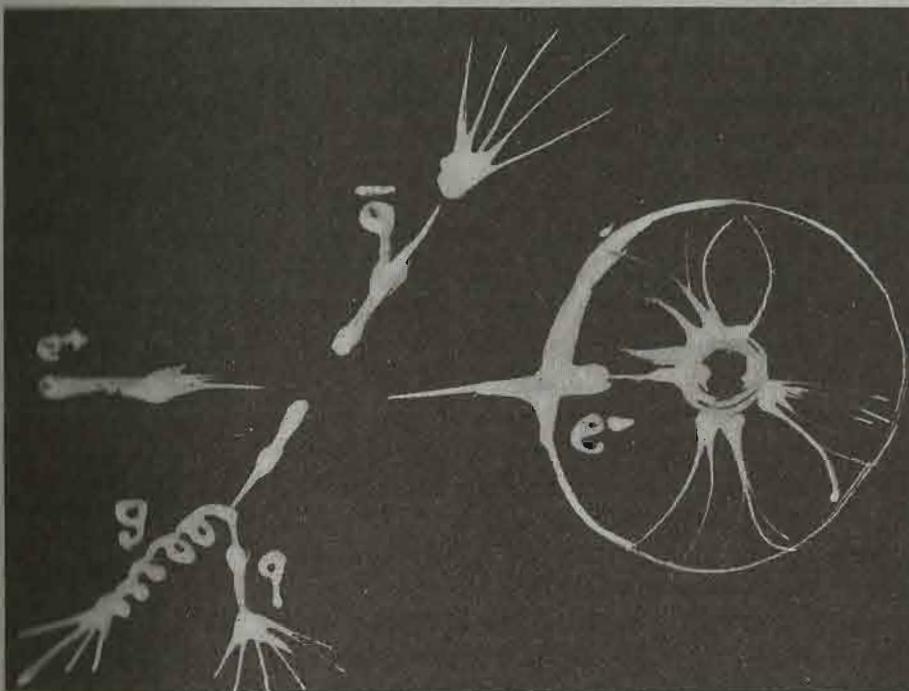
Hasta aquí podríamos decir que las pegas son solamente una cuestión estética. Y literalmente lo es, porque si la simetría gauge no estuviera rota (espontáneamente) todas las partículas care-

LAS PARTÍCULAS EN EL ARTE

La física de partículas ha traspasado las barreras de los libros de texto y de los artículos científicos en numerosas ocasiones. Buen ejemplo de ello es el *best seller* de Dan Brown, *Ángeles y demonios*, en el que una secta amenaza con destruir el Vaticano con una bomba de antimateria. En la rama del cine encontramos el brillante documental *Particle Fever*, con numerosos galardones en festivales cinematográficos, que aborda en el lado más humano de la física de partículas mediante el seguimiento de seis científicos durante la puesta a punto del LHC.

Física y artes plásticas

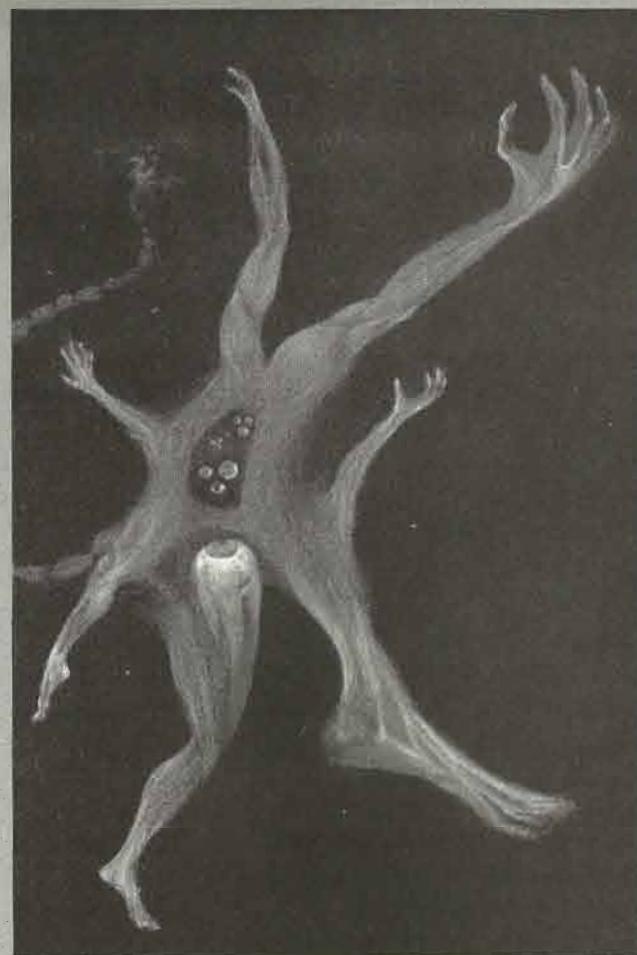
Tanto la física de partículas como las artes plásticas son disciplinas creativas que tratan de explorar nuestra existencia y describir el universo. Existen diversos proyectos que tratan de fomentar esta sinergia. Por ejemplo, en el Instituto Pratt de Nueva York, referencia mundial como escuela de diseño y arquitectura, los estudiantes reciben clases de física de partículas de la mano de investigadores del campo de primer nivel que se traducen en colecciones de moda, esculturas y cuadros inspirados en la estructura de la materia.



Sarah Szabo, pintora de lo subatómico

Una pintora muy representativa de este tipo de arte, Sarah Szabo, proviene precisamente del Instituto Pratt, donde cursó estudios de arte. Sus exposiciones de obras incluyen

Glamorous gluons (*Gluones glamurosos*), un conjunto exhibido en uno de los centros más importantes del mundo en física de partículas, el Laboratorio Nacional de Brookhaven, en Estados Unidos. Entre los temas sobre los que Szabo pinta figuran el plasma de quarks y gluones, la aniquilación mutua entre un electrón y un positrón (véase el cuadro de la página anterior), y la unión entre los quarks a la cual le da un aspecto similar al de una neurona en la pintura reproducida a la izquierda.



Dos obras de Sarah Szabo relacionadas con las partículas subatómicas: en la página anterior, *Electron positron annihilation*; sobre estas líneas, *Infrared slavery/Struggling neuron*.

También música...

El propio CERN cuenta con un departamento de arte en el que tienen cabida artistas de primera talla internacional y cuya colaboración con físicos ha dado lugar a proyectos como *The physics of music and the music of physics*, en el que se utilizan los datos registrados en una colisión entre protones en el LHC para crear sintonías musicales.

cerían de masa y bastaría con tres parámetros, las constantes de acoplamiento de las tres interacciones, para describir toda la fenomenología. Las masas y las mezclas «afean» el modelo, añadiendo un montón de parámetros adicionales (quince y un mínimo de seis más si contamos también los neutrinos). Claro que el número de experimentos independientes en los que se puede comprobar el modelo es mucho mayor que el número de parámetros que necesitamos medir para hacer las predicciones, pero no deja de ser poco «elegante» por su falta de «simplicidad». Además, es notorio que un pequeño cambio en el valor de algunos de estos parámetros alteraría drásticamente el comportamiento del universo, afectando crucialmente a nuestra propia existencia (el universo se habría colapsado demasiado pronto tras el Big Bang, el átomo no sería estable, etc.). Semejante *sintonía fina* puede sugerir que el universo es justo aquel en el que nosotros podamos existir (*principio antrópico*) bien porque ha sido diseñado para tal fin (creado por un ser superior) o bien porque, de los muchísimos que pueden surgir con valores arbitrarios de los parámetros (*multiverso*), vivimos en el que reúne las condiciones apropiadas. Pero, sería mucho más satisfactorio si hubiera una explicación dinámica para tal elección.

Los neutrinos merecen un comentario aparte. Siendo los únicos fermiones neutros, podrían coincidir con su propia antipartícula y esto, entre otras cosas, haría posible que adquirieran su masa por un mecanismo distinto al de Higgs, llamado mecanismo de «balancín» (*seesaw*) que, de forma natural, justificaría su extremada ligereza. La gracia es que en tal caso existirían otros neutrinos extraordinariamente pesados, del orden de 10^{15} GeV/ c^2 , tanto más pesados cuanto más ligeros sean los que ya hemos observado. Obviamente, no podemos producir estos neutrinos superpesados en nuestros aceleradores, pero sus desintegraciones, que violan CP, podrían haber contribuido decisivamente a la generación de la asimetría entre materia y antimateria en el universo temprano.

Hay que confesar, llegados a este punto, que si bien el modelo estándar con tres familias de quarks da buena cuenta de los procesos que violan CP observados en aceleradores, no predice

la «suficiente» asimetría entre materia y antimateria. Este sí que se puede calificar de problema grave. Los neutrinos de balancín ayudarían con su aportación extra. Y hay más razones para pensar que el modelo estándar se queda corto.

Un argumento obvio es que la gravedad, la cuarta interacción fundamental, no forma parte del modelo estándar. Como ya se ha dicho, el problema de fondo es que el campo gravitatorio describe la geometría del propio espacio-tiempo, lo que dificulta técnicamente la formulación de una teoría cuántica de la gravedad, que sufre incongruencias matemáticas. Es bastante posible que una teoría cuántica que incorpore las cuatro interacciones fundamentales no requiera solamente un cambio de modelo sino que necesite de un cambio de paradigma. Una posibilidad es la *teoría de supercuerdas*, en la que las partículas no son excitaciones puntuales de campos cuánticos, sino modos de vibración de objetos unidimensionales, las *cuerdas*. Aunque conviene enfatizar que sus predicciones están muy lejos de poder ser contrastadas en el laboratorio, posee muchas propiedades interesantes. Entre otras, predice la existencia de diez dimensiones espaciales, de las cuales tres son extendidas, las que conocemos, y el resto están «compactificadas» mediante un mecanismo que tal vez permitiría entender por qué vivimos en tres dimensiones. Además, requiere una especie de simetría definitiva, la más general, que relaciona fermiones y bosones, la «supersimetría».

LA MEDIDA DE NUESTRA IGNORANCIA

Pero, indiscutiblemente, el problema más acuciante del modelo estándar es que «solamente» explica la composición e interacciones de una pequeña fracción, alrededor de un 5%, de la materia y energía del universo, la *materia ordinaria*, que forma las estrellas, los planetas, el gas cósmico y todo lo que «vemos», la

Los teóricos pueden estar equivocados, solo la naturaleza tiene siempre razón.

DAVID GROSS

misma que, hasta ahora, hemos producido en nuestros colisionadores de partículas. Del resto solo sabemos que está ahí, pero no lo que es: un vergonzoso 95% de todo lo que existe, porcentaje al que podemos llamar el «lado oscuro» del universo, la medida de nuestra ignorancia. Este «lado oscuro» consta en realidad de dos «componentes», con propiedades muy diferentes: *materia oscura* y *energía oscura*.

La materia oscura es el nombre genérico que damos a una forma de materia, que «gravita» como la materia ordinaria, cuya presencia ha sido confirmada por varias observaciones astrofísicas y cosmológicas independientes, todas ellas basadas en sus efectos gravitatorios, pues no absorbe, ni emite, ni refleja luz. Se necesita para explicar las curvas de rotación de las galaxias, es un ingrediente esencial para justificar el ritmo de expansión del universo y deja huella en la formación de estructuras a gran escala, así como en el espectro de fluctuaciones del fondo de radiación cósmica de microondas, entre otras cosas. Del mismo modo que podemos deducir la masa del Sol a partir del comportamiento de los planetas que lo orbitan y de otros efectos más sutiles, como la deflexión (cambio de dirección) que experimenta la luz de las estrellas cuando pasa cerca del Sol, debido a la curvatura del espacio-tiempo que predice la relatividad general (*lente gravitatoria*), se puede deducir un déficit de masa en las galaxias y en el espacio intergaláctico a partir de la velocidad de rotación de las estrellas en una galaxia y otros efectos sobre la luz procedente de objetos muy lejanos. Todos ellos apuntan, de forma consistente, a que la materia oscura es entre cinco y seis veces más abundante que la materia ordinaria (figura 1).

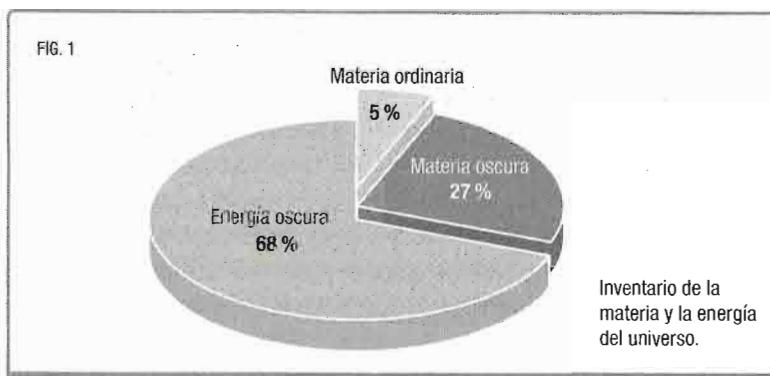
La energía oscura es algo completamente distinto. Se trata de un ingrediente que produce un efecto «antigravitatorio». La expansión del universo debería ser decelerada, cada vez más lenta, debido a la atracción gravitatoria de la materia, ya sea oscura u ordinaria, de la que está compuesto. Sin embargo, a finales de los años noventa se descubrió todo lo contrario: ¡el universo se expande cada vez más deprisa! No sabemos qué produce esta aceleración. Podría ser una *constante cosmológica*, una densidad de energía del vacío de valor constante que introdujo Einstein

en sus ecuaciones para forzar un universo estático, poco antes de que Edwin Hubble descubriera en 1929 que en realidad se encuentra en expansión. El propio Einstein declaró que semejante idea, que ya no era necesaria, fue «su mayor equivocación», pero curiosamente hoy recurrimos a ella para no solo contrarrestar sino incluso vencer la atracción de la materia y explicar así la reaceleración observada. Parece que Einstein tenía razón hasta cuando se equivocaba. Esta constante cosmológica es cada vez más importante conforme la densidad de materia del universo se va diluyendo al aumentar este de volumen. En la etapa actual del universo, la energía oscura más que duplica la suma de materia ordinaria y oscura (figura 1).

Es responsabilidad de la física de partículas proponer candidatos viables que puedan componer la materia oscura y tal vez intentar explicar qué es la energía oscura como resultado de la dinámica de algún campo escalar lentamente variable, que en algunos modelos se llama *quintaesencia*, en recuerdo del quinto elemento de la antigua Grecia, el material del que estaría hecho el cielo.

La materia oscura podría estar compuesta por uno o varios tipos de partículas, que deben ser neutras, estables (o de vida comparable a la edad del universo) e interactuar muy débilmente con la materia ordinaria. Es necesario ampliar el modelo estándar con nuevos campos que cumplan estos requisitos.

Entre las extensiones más estudiadas del modelo estándar se encuentra su versión supersimétrica, que duplica el número



de partículas conocidas asignando un compañero a cada una de ellas, con iguales interacciones, excitaciones del mismo «supercampo», pero distinto espín: a cada fermión de espín 1/2 (quarks y leptones) un bosón de espín 0 (*squarks* y *sleptones*); a cada bosón de espín 1 (bosones gauge: fotón, W, Z y gluones) un fermión de espín 1/2 (*fotino*, *wino*, *zino* y *gluinos*). Y a los bosones de Higgs de espín 0, que son cinco en este modelo, se les asignan fermiones de espín 1/2 (*higgsinos*). La supersimetría no es exacta, pues de lo contrario todas las partículas tendrían la misma masa que sus compañeros supersimétricos, y (todavía) no hemos encontrado ninguno, así que deben ser más pesados. Sin embargo, la supersimetría puede romperse «suavemente», manteniendo intactas sus varias virtudes, siempre que los supercompañeros no tengan masas mucho mayores que $1 \text{ TeV}/c^2$, al alcance del LHC, de ahí una buena parte del gran interés de este modelo.

El modelo estándar supersimétrico proporciona candidatos para la materia oscura, posiblemente, la partícula más ligera de ciertas combinaciones de higgsino, fotino y zino que llamamos *neutralinos*. También aporta nuevas fuentes de violación de CP capaces de dar cuenta de la asimetría materia-antimateria. Además, debido a la existencia de campos adicionales, las constantes de acoplamiento de las interacciones electromagnética, débil y fuerte varían con la escala de tal forma que milagrosamente las tres toman el mismo valor a una energía de unos 10^{16} GeV , correspondiente a una distancia de unos 10^{-32} m . Esta *gran unificación* de las tres fuerzas es muy sugerente, y no se da en el modelo estándar sin supersimetría.

Sería muy raro que la naturaleza no hiciera uso de esta simetría «suprema», y a la vez una excelente oportunidad que la primera manifestación de su existencia fuera la resolución de una tacada del problema de la materia oscura y de la proporción entre materia y antimateria en el universo, junto a otras cuestiones más técnicas que no hemos mencionado. Y recordemos que la supersimetría es un requisito imprescindible para las teorías de cuerdas, que incorporan la gravedad cuántica, un primer paso para construir la *teoría del todo*. El hecho de que sea una sime-

tria rota a las escalas que exploramos actualmente resta fuerza al argumento, aunque no lo invalida necesariamente.

Por otro lado, es seguramente muy aventurado creer que a partir de las observaciones a una cierta escala podemos deducir el comportamiento del universo a «todas» las escalas. Pensemos en el cambio de concepción que supuso adentrarse en las escalas subatómicas. Es esperable que, según vayamos subiendo la energía, resolviendo escalas cada vez más pequeñas, nos encontremos nuevas sorpresas.

En particular, no es descartable que lleguemos a descubrir otras dimensiones espaciales. Para comprender su significado y cómo tendrían que ser, lo mejor es pensar en un objeto que «aparentemente» tiene, visto de lejos, menos de tres dimensiones. Por ejemplo, un hilo solo parece tener una dimensión, a lo largo, hasta que nos acercamos lo suficiente para resolver su grosor, las otras dos dimensiones, o bien hasta que colocamos sobre él una hormiguita de tamaño menor al de las dimensiones adicionales, que será capaz de caminar alrededor del hilo aunque de lejos parecería que no se mueve del mismo punto. Decimos que estas dimensiones extra son compactas, es decir, se encuentran *enrolladas* en un espacio muy pequeño. Pues bien, es posible que nuestro mundo aparentemente tridimensional sea como ese hilo y que desde cada punto del espacio 3D se desplieguen una, dos o más dimensiones compactas adicionales que se puedan resolver con un microscopio suficientemente potente. El microscopio es nuestro colisionador, que resuelve distancias cada vez menores conforme subimos la energía. Simplificando mucho, cuando una partícula estándar tiene una energía superior a $E_1 = \hbar c/R$, donde R es el tamaño de la dimensión extra, «aparece» ser otra partícula (su primer modo de Kaluza-Klein) de masa $m_1 = E_1/c^2$. Y habría una torre de partículas cuyas masas son múltiplos enteros de esta. La partícula de Kaluza-Klein más ligera sería un candidato viable para la materia oscura.

Cabe preguntarse si existe una escala fundamental en el universo, una longitud o energía, que marque alguna frontera natu-

Apréndelo todo, verás después que nada es superfluo.

HUGO DE SAN VÍCTOR

ral. Recordemos que la constante reducida de Planck, \hbar , establece la escala de los fenómenos cuánticos y que la velocidad de la luz, c , es una velocidad universal límite. Además, tenemos la constante de Newton de la gravedad universal, G , que también aparece en la relatividad general regulando la relación entre la masa y la curvatura del espacio-tiempo. Con estas tres constantes fundamentales puede construirse una escala con unidades de longitud (l_p) o de energía (E_p) llamada *escala de Planck*,

$$l_p = \sqrt{\frac{G\hbar}{c^3}} = 1,6 \cdot 10^{-35} \text{ m} \quad E_p = \sqrt{\frac{\hbar c^5}{G}} = 1,2 \cdot 10^{19} \text{ GeV.}$$

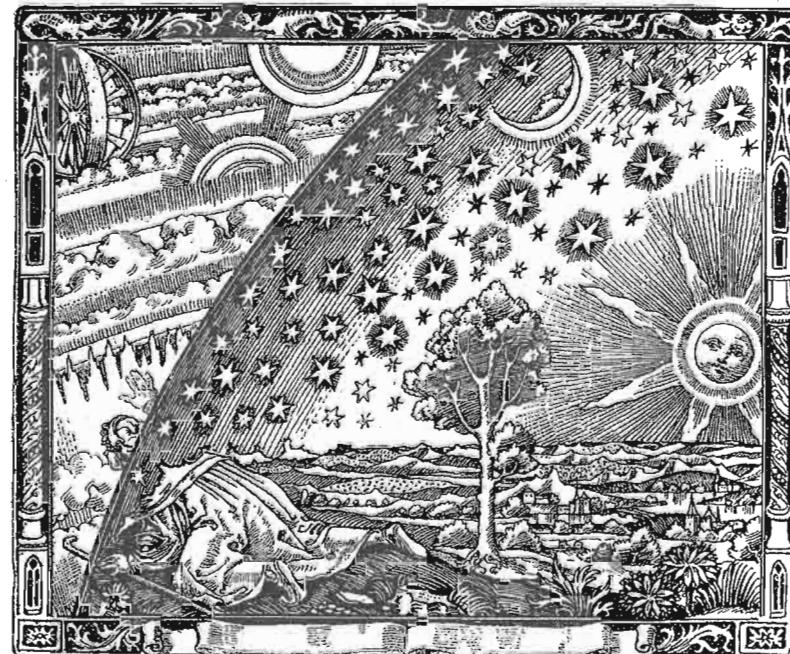
La escala de Planck determina el tamaño de las cuerdas en la teoría de cuerdas, el tamaño y masa del agujero negro más pequeño que puede formarse, la escala a la que los efectos de gravedad cuántica son relevantes. Es por tanto la distancia más pequeña que jamás podrá resolverse mediante una colisión de partículas, pues el resultado de la misma sería la formación de un agujero negro del que no extraeríamos ninguna información (mayor energía solo produciría un agujero negro más grande).

Al menos tenemos una idea de hasta dónde podríamos llegar, aunque nuestros experimentos están muy lejos de alcanzar esas escalas. Concretamente, quince órdenes de magnitud. Resulta bastante desolador. Una importante cura de humildad.

SEGUIMOS EXPLORANDO

Nos queda mucho por aprender. Aunque no sabemos si los descubrimientos están a la vuelta de la esquina. Desde que encontramos la última pieza del modelo estándar, trabajamos sin un mapa, como los antiguos navegantes, que se adentraban en lo desconocido, con muchos prejuicios pero con el convencimiento de que había algo más allá.

También los físicos tenemos nuestras sospechas, como la supersimetría y las dimensiones extra. Y no faltan misterios por



Un missionnaire du moyen âge raconte qu'il avait trouvé le point où le ciel et la Terre se touchent...

Arriba, el experimento LUX (izquierda) pretende desvelar cuál es la identidad de la materia oscura, cuya existencia revelan imágenes astronómicas como la del Cúmulo Bala (derecha). Abajo, ilustración del libro *La atmósfera: meteorología popular* (C. Flammarion, 1888) en la que un misionero dice haber encontrado el punto en el que se tocan el cielo y la Tierra.

resolver. La materia oscura y la energía oscura son los más candentes.

El LHC seguirá operando al menos otra década y todavía puede desvelar alguna señal de física más allá del hasta ahora inquebrantable modelo estándar, quizás para arrojar algo de luz sobre los enigmas que tenemos planteados, o tal vez para plantear otros nuevos.

Y no hay que perder de vista otros experimentos, como las factorías de partículas, que son muy sensibles a desviaciones respecto a las predicciones estándar, los experimentos de neutrinos, que pronto podrían desvelar si son su propia antipartícula, lo que de forma indirecta revelaría la existencia de partículas a una escala muy cercana a la de gran unificación, o los experimentos de detección directa de materia oscura, que pueden informarnos sobre su composición e interacciones, cubriendo un rango más amplio que el LHC. También los rayos cósmicos y otras astropartículas pueden enseñarnos más cosas sobre la materia oscura.

Seguimos buscando las claves del universo, que se hallan escondidas en algún lugar entre el cielo y la Tierra.

LECTURAS RECOMENDADAS

- ASIMOV, I., *El electrón es zurdo y otros ensayos científicos*, Madrid, Alianza Editorial, 1972.
- CASAS, A., *El lado oscuro del universo*, Madrid, CSIC/Los Libros de la Catarata, 2010.
- : *El LHC y la frontera de la física*, Madrid, CSIC/Los Libros de la Catarata, 2009.
- CASAS, A. y RODRIGO, T., *El bosón de Higgs*, Madrid, CSIC/Los Libros de la Catarata, 2012.
- DAVIES, P., *Superfuerza*, Barcelona, Salvat Editores, 1994.
- FERNÁNDEZ-VIDAL, S. y MIRALLES, F., *Desayuno con partículas*, Barcelona, Plaza & Janés Editores, 2013.
- GIUDICE, G.F., *Odisea en el zeptoespacio*, Sevilla, Jot Down Books, 2013.
- GREENE, B., *El tejido del cosmos*, Barcelona, Editorial Crítica, 2010.
- LEDERMAN, L. y TERESI, D., *La partícula divina: si el universo es la respuesta, ¿cuál es la pregunta?*, Barcelona, Editorial Crítica, 1996.
- PASTOR, S., *Los neutrinos*, Madrid, CSIC/Los Libros de la Catarata, 2014.
- 'T HOOFT, G., *Partículas elementales: en busca de las estructuras más pequeñas del universo*, Barcelona, Editorial Crítica, 2008.

- acelerador de partículas 11, 34, 75-78, 85, 96, 102, 104, 140, 144
Ampère, André-Marie 16
anchura de desintegración 60
Anderson, Carl David 33, 76
ángstrom 55, 56, 72
antimateria 9, 33, 65, 95, 97-99, 117, 141, 142, 144, 145, 148
antipartícula 31, 33, 34, 36, 61-63, 65, 66, 68, 76, 84, 87, 89, 92, 95, 96, 100, 106, 120, 122, 127, 144, 152
Aristóteles 15
asimetría materia-antimateria 98, 117, 141, 144, 145, 148
átomo 8, 10, 15, 17, 21, 24, 25, 27, 30, 32, 34, 35, 49, 51, 58, 69, 72-75, 78, 80, 81, 90, 92, 94, 95, 98, 125, 135, 144
de Bohr 27, 32, 54, 55
de Rutherford 24, 25, 80
de Thomson 24, 35
bariones 10, 84-90, 92-94, 104
Becquerel, Henri 24
Bohr, Niels 25, 27, 30, 35
Born, Max 30, 57
bosón 32, 87, 112, 113, 120, 121, 128-130, 133-135, 140, 145, 148
de Goldstone 128, 133
de Higgs 10, 11, 78, 79, 117, 129, 133-135, 140, 148
W 77, 120-122, 125, 130, 132-135, 148
Z 60, 77, 120, 121, 125, 130, 132-135, 141, 148
Brout, Robert 129
Cabibbo, Nicola 122
camino
cuántico 61
óctuple 86
campo 9-11, 19-21, 24, 36, 61-63, 66-68, 74-76, 80, 95, 99-104, 113, 114, 118-120, 126-129, 132-135, 145, 147, 148
cuántico 8-11, 36, 37, 61, 65, 68, 69, 113, 117, 127, 130, 140, 145

de Higgs 109, 128-130, 132, 133, 135, 136, 141
de materia 62, 118, 119, 125, 127, 132-134
electromagnético 20, 24, 36, 62, 66, 98, 100, 101, 114, 116, 120, 140
gauge 114, 118-120, 123-125, 128, 132, 133
cargas 16, 19-21, 24, 25, 32, 33, 62, 80, 82, 84, 87-89, 94-96, 99-104, 106, 113, 114, 116-120, 123, 124, 132
causalidad 63, 65
Chadwick, James 25, 80, 82
color (propiedad de los quarks) 92-94, 103, 104, 106, 118, 119, 123, 124, 132
Compton, Arthur 30
efecto 28-30
conexión espín-estadística 112
confinamiento del color 94, 104, 124
constantes de acoplamiento 100, 107, 108, 118, 123, 144, 148
Coulomb, Charles-Augustin de 16
Cowan, Clyde L. 83
Cronin, James W. 117
cuadrimomento 45, 49
cuanto 9, 11, 26, 27, 30, 36, 46, 48, 51, 61-63, 65, 66, 68, 74, 95, 99, 100, 125, 127, 129, 134, 135
cuerpo negro 26
Curie, Marie y Pierre 24, 35

Dalton, John 17, 21
Davisson, Clinton Joseph 31
De Broglie, Louis-Victor 30, 54, 58
Demócrito 15
detector 9, 77-80, 100, 131
difracción 8, 18, 31, 35, 51, 52, 58
dilatación temporal 44
dimensiones extra 11, 145, 149, 150
Dirac, Paul 31-33, 140
doble rendija 51, 55, 61, 68

dualidad onda-corpúsculo 30, 51
efecto fotoeléctrico 27, 30
Einstein, Albert 11, 19, 20, 27, 41, 42, 45, 51, 90, 115, 140, 146, 147
electromagnetismo 10, 21, 25
electrón 8, 21, 22, 24, 25, 27-30, 50, 51, 53-55, 57, 58, 60, 61, 64-68, 72, 73, 75-78, 80-84, 86, 92, 94, 95, 97-101, 105, 107, 112, 114, 119, 121, 123-125, 129, 134, 135, 140, 141, 143
electronvoltio 56, 72
elemento (según las creencias de la Antigüedad) 15, 147
químico 17, 34, 49, 80, 86, 112
energía 9, 20, 24-30, 32-34, 36, 39, 40, 45, 46, 48-51, 54-57, 59, 60, 62, 65-69, 72, 74-78, 82-84, 89, 93, 94, 96, 98-100, 102, 104, 113, 125-130, 134, 135, 137, 139, 145-150
cinética 40, 41, 45, 46, 48, 50, 74, 130
 $E=mc^2$ (fórmula de equivalencia entre masa y energía) 31, 34, 45, 49, 98, 130
oscura 146, 147, 152
Englert, François 129
espacio-tiempo 10, 44, 45, 63, 64, 99, 145, 146, 150
espín 31-33, 62, 65, 66, 82, 87, 93, 102, 106, 112, 113, 116, 118, 119, 128, 133, 148
espinor 32
extrañeza 86-90

Faraday, Michael 16, 19
Fermi, Enrico 82, 102
fermi (fentómetro) 56, 72
fermiones 32, 33, 66, 82, 87, 93, 96, 112, 113, 121, 130, 132, 133, 136, 144, 145, 148
Feynman, Richard 57, 63, 140
diagrama de 65-68, 101, 105
fisión nuclear 50, 99
Fitch, Val L. 117

fluctuación cuántica 59, 64
fotón 23-30, 33, 36, 48-51, 54, 59-63, 65-68, 72-74, 76, 83, 92, 96, 98, 100-102, 104, 106, 120, 123-125, 132, 135, 140, 148
Franklin, Benjamin 16
frecuencia 17, 26, 27, 30, 48, 49, 59, 62
Fresnel, Augustin-Jean 18
fuerza 8, 11, 15, 16, 19, 20, 36, 37, 39, 40, 57, 62, 81, 83, 99, 100, 103-107, 114, 123, 130, 139, 140, 148
 fusión nuclear 96, 99, 135

Galilei, Galileo 15, 41, 140
Geiger, Hans 24
Gell-Mann, Murray 86, 87
Germer, Lester H. 31
Glashow, Sheldon L. 132
gluones 74, 103-108, 123-125, 132, 133, 135, 140, 143, 148
bolas de (*glueballs*) 104
Goldstone, Jeffrey 129
gravedad 10, 11, 16, 39, 41, 99, 107, 108, 145, 148, 150
Gross, David 124, 145
Guralnik, Gerald 129

hadrones 76, 86-90, 92-96, 98, 103, 104, 106, 135
hadronización 93, 103, 104
Hagen, Carl R. 129
Heisenberg, Werner 140
principio de incertidumbre de 58, 83, 93
Hertz, Heinrich Rudolf 18, 27
Higgs, Peter 129-131
mecanismo de 128, 132
hipercarga 118-120
Hooke, Robert 18
Huygens, Christiaan 18

interacción
alcance de la 10, 11, 16, 83, 99, 102, 103, 106, 107, 125, 130, 132
débil 10, 34, 65, 68, 78, 82, 86, 89, 90, 96, 99, 103, 103, 106-108, 116, 117, 119-123, 125, 130, 132, 133, 136, 148

electromagnética 10, 68, 80, 83, 89, 92, 98-101, 106-108, 114, 120, 121, 123, 125, 130, 132, 133, 135, 148

fuerte 10, 34, 74, 81, 86, 89, 90, 92, 93, 96, 98, 102-104, 106, 107, 119, 120, 123, 125, 132, 133, 135, 148

gravitatoria 10, 11, 99, 108

intensidad de la 11, 90, 101, 106, 107, 118, 123, 130

mensajeros de la 100, 107

vértice de la 65, 66, 68, 86, 101, 103, 120, 121, 123

isoespín débil 118-120

isótopo 80, 97

jet 91, 93, 104, 105

Kibble, Tom 129
Kobayashi, Makoto 122, 129

Lederman, Leon 85
Lee, Tsung-Dao 116
leptones 10, 84-86, 90, 92, 95, 96, 102, 106, 119, 121, 122, 129, 132, 134, 140, 141, 148

ley de conservación 60, 84, 113

LHC 11, 46, 47, 50, 74, 77-79, 107, 129, 133, 142, 143, 148, 152

libertad asintótica 106, 124

longitud de onda 17, 18, 24-28, 30, 31, 52-55, 58, 59, 71, 72, 107
de De Broglie 30, 54, 58

Lorentz, transformaciones de 43-48

luz 17, 18, 20, 25, 27-30, 36, 39, 41-46, 48, 49, 51-55, 63-65, 71, 72, 78, 95, 98, 100, 135, 146

velocidad de la 17, 19-21, 27, 41-44, 46, 48, 50, 56, 62-65, 68, 125, 130, 150

visible 17, 18, 24, 26, 55, 71

Marsden, Ernest 24
masa 9-11, 16, 17, 21-25, 28, 31, 32, 34, 39-41, 46, 46, 48-50, 58-60, 62, 65-68, 74, 77, 80, 82-85, 87-92, 95, 96, 98, 99, 102, 104, 106-109, 123, 125, 127-130, 132, 133, 135, 136, 139-141, 144, 146, 148-150
Maskawa, Toshihide 122, 129
materia oscura 11, 146-149, 151, 152
Maxwell, James Clerk 17-21, 36, 62
Mendeléyev, Dmitri I. 80, 81, 86
mesones 10, 84-90, 92, 94, 102-104, 106-108, 117
Michelson, Albert Abraham 19
modelo estándar 10, 11, 78, 102, 119, 132-134, 137, 140, 141, 144, 145, 147, 148, 150, 152
momento
 angular orbital 27, 30-32, 55
 lineal 45, 54, 113
Morley, Edwards Williams 19
muon 34, 60, 65-68, 76, 84, 86, 90-92, 96, 102, 140

Nambu, Yoichiro 129
neutrinos 11, 66, 68, 76, 80, 82-86, 95, 96, 99, 116, 119-122, 132, 134, 140, 141, 144, 152
 de balancín (*seesaw*) 144, 145
 oscilaciones 96, 122
neutrón 10, 25, 34, 50, 51, 72, 74, 76, 80-85, 87, 89-92, 94-96, 98, 102, 103, 112, 125, 134, 135
Newton, Isaac 15, 16, 18, 20, 40, 140
Noether, Emmy 113, 115
núcleo atómico 10, 24, 25, 32, 34, 35, 50, 57, 72-76, 80-83, 95, 96, 98, 99, 102, 103, 107, 108, 125, 134, 135
radiactivo 81
nucleón 81, 83, 86, 90, 98, 102, 103, 106, 108
número
 bariónico 85, 87, 116, 119, 121
 leptónico 84, 86, 96, 116, 119, 121

Oersted, Hans Christian 16
onda
 de probabilidad 57
 electromagnética 17, 18, 20, 21, 25, 27, 48, 62
 función de 30, 32, 33, 57, 61, 62, 112
orbital atómico 57, 72, 112

paradigma 8-11, 13, 15, 33, 140, 145
partícula 7-11, 18, 20-24, 31-37, 46, 50, 51, 53, 54, 60-63, 65-69, 72-78, 80-87, 89-91, 94-96, 100-103, 105-107, 109, 112, 116, 117, 119, 120, 123, 125, 127, 129, 130, 132-135, 140-143, 145-150, 152
 de Kaluza-Klein 149
 virtual 59, 60, 65-68, 83, 100, 101, 103, 105, 124
Pauli, Wolfgang 82, 140
 principio de exclusión de 33, 93, 112
pentaquarks 92, 93
Perl, Martin 86
Planck, Max 26, 27, 51, 62, 140
 constante de 26, 27, 29, 56, 57, 61, 150
 escala de 150
Politzer, David 124
positrón 33, 36, 64-68, 76, 77, 81, 82, 92, 96, 97, 99-101, 105, 124, 143
positrónio 92
potencias de diez 56
premios Nobel 27, 35, 116, 122, 124, 129, 132
protón 10, 22, 25, 34, 46, 50, 51, 73-77, 80-87, 89-92, 94-96, 98, 102, 103, 107, 108, 123-125, 134, 135, 143

quarks 10, 74, 75, 81, 86-96, 98, 102-108, 119-125, 129, 132, 134, 135, 140, 141, 143, 144, 148
 b (*bottom o beauty*) 90, 92, 93, 95, 119, 134

c (*charm*) 90, 90, 93, 95, 119, 134
d (*down*) 88-90, 93-95, 119, 131, 125, 134, 136
s (*strange*) 88-90, 93, 93, 95, 119, 134
t (*top*) 90-93, 95, 98, 119, 134, 141
u (*up*) 88-90, 93-95, 119, 131, 136, 134, 135

radiación 10, 11, 24-27, 30, 36, 50, 51, 76-77, 82, 100, 102, 146
 alfa 24, 76
 beta 24, 76, 81-83, 95, 96, 99, 102, 116
 gamma 24, 33, 76, 97
 sincrotrón 77, 78, 100, 102
radiactividad 24, 76, 81, 82, 99
rayos
 catódicos 21, 24, 80
 cósmicos 10, 33, 50, 75, 76, 84, 96, 152
 X 24, 35
Reines, Frederick 83
resolución 59, 72, 97, 111, 137, 148
Richter, Burton 89
Röntgen, Wilhelm 24
Rubbia, Carlo 102
running 123
Rutherford, Ernest 24, 25, 80, 94

sabor 86, 88-90, 93, 95, 96, 102, 103, 121, 122, 124, 134, 141
Salam, Abdus 132
Schrödinger, Erwin 30, 31, 36, 54, 140
Schwartz, Melvin 85
simetría 9-11, 90, 109, 111-114, 116-118, 120, 121, 125-127, 130, 140, 141, 145, 148
 C (conjugación de carga) 116
 continua 113, 116, 126
 CP 117, 122, 141, 144, 148
 CPT 117
 de intercambio 111, 112
 discreta 116, 117, 126

gauge 114, 116, 118-120, 123-126, 137-139, 139, 139, 141
global 114, 116
interna 113, 114, 116
P (inversión de paridad) 116
rotura espontánea de la 125-130, 132, 133
T (inversión temporal) 116, 117
Steinberger, Jack 85
supersimetría 145, 148, 150

tau 86, 95, 96, 119, 134, 140
teoría
 cuántica 8-11, 25, 36, 37, 51, 57, 58, 61, 63, 65, 99, 113, 122, 130, 140, 145
 de cuerdas 145, 148, 150
 de la relatividad especial 19-21, 140
 de la relatividad general 11, 99, 146, 150
tetraquarks 92, 93
Thomson, George Paget 31, 35
Thomson, Joseph John 21, 24, 35, 80
Ting, Samuel Chao Chung 89

vacío 17, 18, 20, 24, 32, 34, 36, 76, 124, 127-130, 133, 136, 146
Van der Meer, Simon 102
vida media 34, 60, 81, 91, 141
violación
 de C 117
 de CP 117, 122, 141, 148
 de P 116, 117, 119
 de T 117

Weinberg, Steven 132
Wilczek, Frank 124
Wu, Chien-Shiung 116

Yang, Cheng Ning 116
Young, Thomas 18, 53
Yukawa, Hideki 83, 84, 103, 106

Zweig, George 87

Las partículas elementales

Para describir el comportamiento de la materia a escala subatómica es indispensable liberarse de las ataduras de la intuición y ponerse en manos de la teoría de la relatividad especial, según la cual masa y energía son intercambiables, y de la teoría cuántica, que nos muestra un mundo gobernado por la incertidumbre y la probabilidad. Las partículas elementales no son entonces objetos microscópicos indivisibles sino paquetes de energía de los campos cuánticos. De esta manera, y guiados por las simetrías del universo, nos acercaremos a los constituyentes de la materia, sus interacciones e incluso al origen de la masa.

José Ignacio Illana es profesor de Física Teórica en la Universidad de Granada.